



Pedro Silveira Duarte

Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

Influência da rugosidade das planícies de inundação na capacidade de vazão de rios

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil – Perfil de construção

Orientador: João Gouveia Aparício Bento Leal,
Professor Auxiliar da Faculdade de Ciências e
Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Co-orientador: Teresa Viseu Sarrico Santos,
Investigadora Auxiliar do Laboratório
Nacional de Engenharia Civil

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Daniel Aelenei
Arguente: Prof. Doutor Pedro Manuel Hora Santos Coelho
Vogal: Prof. Doutor João Gouveia Aparício Bento Leal
Vogal: Prof. Doutora Teresa Viseu Sarrico Santos



Janeiro de 2012

“Copyright” Pedro Silveira Duarte, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Poder agradecer a quem tornou a realização deste trabalho possível, é a melhor forma de iniciar a apresentação desta dissertação.

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao Professor João Gouveia Leal, pela sua total disponibilidade e presença, bem como a amizade e motivação transmitidas, que foram fundamentais para o desenvolvimento do trabalho. Não esquecendo o seu profundo conhecimento científico do tema, que se tornou numa mais-valia para esta dissertação.

Agradeço o apoio da Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT), através do projecto PTDC/ECM/70652/2006.

Os trabalhos experimentais, que foram a base para o desenvolvimento desta dissertação, foram realizados no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), no pavilhão de Hidráulica Fluvial, o que me possibilitou entrar em contacto com o meio científico e ter instalações adequadas para a recolha dos dados. Deste modo, queria agradecer à Eng. Teresa Viseu a oportunidade concedida.

O apoio do colega e amigo Eng. João Fernandes (LNEC) foi fulcral. Sempre se apresentou disponível e presente ao longo de todo o trabalho desenvolvido. Ficam aqui os meus agradecimentos.

Agradeço também a todo o pessoal de apoio ao pavilhão de Hidráulica Fluvial, que possibilitaram sempre que as instalações para os procedimentos experimentais estivessem em condições técnicas óptimas para serem utilizadas.

Por fim, o agradecimento à minha família e amigos, pelo seu apoio, amizade e motivação constantes, que sempre me transmitiram.

Resumo

Em condições normais, os rios e ribeiras apresentam escoamento somente no seu leito principal com uma secção transversal simples. No entanto, quer por motivos naturais, quer por intervenção humana, podem surgir condições que levam ao transbordo do leito principal, havendo inundação das planícies de inundação, ou, leitos de cheia. Desta forma, passa a existir um escoamento em secção composta, que impõe novos condicionalismos à capacidade de vazão dos rios. Estas novas propriedades de escoamento estão relacionadas com as diferentes alturas de água e com as características do fundo, de cada leito, que resultam em diferentes velocidades de escoamento, tornando a estrutura do escoamento complexa, gerando trocas de massa e de quantidade de movimento entre subsecções do canal.

Apesar de grande parte dos estudos realizados nesta área considerarem condições de regime uniforme, tais condições são raras na natureza. De facto, o escoamento em cursos de água realiza-se usualmente em regime não uniforme. Na presente dissertação estudaram-se experimentalmente diversos regimes não uniformes que resultaram da subalimentação ou sobrealimentação dos leitos de cheia, relativamente às condições de regime uniforme.

Para além disso, as planícies de inundação encontram-se por vezes cobertas por vários tipos de vegetação, que podem modificar as condições do escoamento. Sendo assim, a rugosidade imposta por essa vegetação é simulada, neste caso, recorrendo a panos de relva sintética, implementados num canal prismático experimental com secção composta.

Nas condições referidas, o escoamento apresenta vários comportamentos e fenómenos, que ainda não se encontram bem identificados e definidos, tal como transferência de quantidade de movimento entre os dois leitos e correntes secundárias, decorrentes da diferença de velocidades e verificada entre os dois leitos na zona onde se cruzam (i.e. interface). Pretende-se com este trabalho experimental recolher dados de velocidades, alturas de água e tensões tangenciais, passando depois a analisá-los e compará-los para diferentes alturas relativas de água, leitos de cheia com e sem rugosidade, bem como para diversos regimes de escoamento, uniformes e não uniformes.

Termos chave: Canal de secção composta; Capacidade de vazão de rios; Planícies de inundação rugosas; Escoamento uniforme e não uniforme.

Abstract

Under regular conditions, rivers flow through their main channel, with a simple cross-section. However, either for natural reasons or human intervention, there might be occasions in which the river reaches *bankfull* level and overbanks to adjacent fields, also called, floodplains, originating a compound channel flow that will impose new characteristics to the river conveyance. These new flow properties are linked to different water depths and bed roughness observed in each plain, resulting in different flow velocities, making the flow structure complex, generating mass and momentum transfer between channel subsections.

Although uniform flow conditions are assumed in the majority of studies carried out in this topic, such conditions are rare in nature. In fact, the flow regime in rivers is usually non-uniform. In this dissertation several non-uniform flows were experimentally studied by under- or over-feeding the floodplains, relatively to uniform flow conditions

Moreover, in many occasions, the floodplains are covered by different types of vegetation, which can modify the flow conditions. Therefore, in this study, the roughness imposed by vegetation is simulated by using artificial grass carpets in an experimental prismatic flume with compound cross-section

In these conditions, river flow present characteristics that are not yet well identified and explained, such as momentum transfer between mains channel and floodplain, and secondary currents, that are a result of the velocity difference between both plains in their interface. The objective of this experimental work is to gather velocity, water depth and stress tensor data, and then analyze and compare it with different relative depths, smooth and rough floodplains and different types of flow, uniform and non-uniform.

Keywords: Compound channel; River conveyance; Rough floodplains; Uniform and non-uniform flow.

Índice

1	Introdução	1
1.1	Considerações gerais	1
1.2	Objectivos	2
1.3	Organização da dissertação	3
2	Revisão bibliográfica	5
2.1	Escoamento uniforme em canais com secção composta com fundo liso	5
2.2	Escoamento não uniforme em canais com secção composta com fundo liso	9
2.3	Escoamento uniforme em canais com secção composta com fundo rugoso	11
3	Procedimento e Instalação experimental	17
3.1	Canal de secção composta	17
3.2	Equipamentos de medição e controlo	20
3.2.1	Vectrino	20
3.2.2	Caudalímetros	23
3.2.3	Teodolito e hidrómetro	24
3.3	Procedimento experimental	25
4	Processamento dos dados	31
4.1	Obtenção dos valores médios	31
5	Apresentação e discussão dos resultados	37
5.1	Fundo Liso	37
5.1.1	Regime Uniforme - $h_r=0,15$ / $h_r=0,20$ / $h_r=0,30$	37
5.1.2	Regime Não Uniforme - $h_r=0,20$ / $h_r=0,30$	60
5.2	Fundo Rugoso	72
5.2.1	Regime Uniforme - $h_r=0,15$ / $h_r=0,30$	72
6	Conclusões	87
7	Bibliografia	91

8	Anexos.....	93
----------	--------------------	-----------

Índice de Quadros

Quadro 3.1 - Resumo ensaios realizados – Fundo rugoso.	29
Quadro 3.2- Resumo ensaios realizados – Fundo liso.	29
Quadro 5.1 – Caudais (l/s) impostos para obtenção do regime uniforme - Fundo liso.....	37
Quadro 5.2 – Alturas (cm) médias de água transversais em regime uniforme – Fundo liso.....	38
Quadro 5.3 – Caudais (l/s) obtidos experimentalmente em regime uniforme – $h_r=0,15$ em fundo liso.	38
Quadro 5.4 – Caudais (l/s) obtidos experimentalmente em regime uniforme – $h_r=0,20$ em fundo liso.	48
Quadro 5.5 – Caudais (l/s) obtidos experimentalmente em regime uniforme – $h_r=0,30$ em fundo liso.	53
Quadro 5.6 – Caudais (l/s) impostos para obtenção do regime não uniforme - Fundo liso.....	60
Quadro 5.7 – Alturas (cm) médias de água transversais em regime não uniforme – Fundo liso.....	61
Quadro 5.8 - Caudais (l/s) impostos para obtenção do regime uniforme - Fundo rugoso.....	73
Quadro 5.9 – Alturas (cm) médias de água transversais em regime uniforme – Fundo rugoso.....	73
Quadro 5.10 – Caudais (l/s) obtidos experimentalmente em regime uniforme – $h_r=0,15$ em fundo rugoso.	74
Quadro 5.11 – Caudais (l/s) obtidos experimentalmente em regime uniforme - $h_r=0,30$ em fundo rugoso.	80

Índice de Figuras

Figura 1.1 - Configuração da secção transversal (composta) do rio.....	2
Figura 2.1 - Desenvolvimento da camada limite sobre uma superfície sólida (Adaptada de Massey, 2002).....	6
Figura 2.2 - Desenvolvimento da camada de mistura na interface do leito principal e leitos de cheia para: a) Posição no início do canal; e b) Posição a jusante do início do canal (Adaptada de Nijs, 2003).....	7
Figura 2.3 - Esquema dos vórtices de eixo vertical e horizontal verificados na interface LC-LP (Adaptada de Prooijen et al., 2005).....	7
Figura 2.4 - Estrutura turbulenta de um escoamento em secção composta (Adaptada de Shiono e Knight, 1991).....	8
Figura 2.5 - Exemplo de configuração do canal vista em planta com leitos de cheia divergentes	10
Figura 2.6 - Esquema de alimentação para canal de secção composta: a) Alimentação do canal sem separação entre os dois leitos; e b) Alimentação do canal separada para cada um dos leitos (Adaptada de Bousmar et al., 2005).....	11
Figura 2.7 - Altura cinética e perfil de velocidades num canal sem separação da alimentação de caudais iniciais, visto no início do canal e a uma distância a jusante. a) vista lateral b) vista em planta (Adaptada de Bousmar et al., 2005).....	11
Figura 2.8 - Velocidades longitudinais (cm/s): a) fundo liso; b) e fundo rugoso (relva) (Retirada de Yang et al., 2007).	12
Figura 2.9 - Perfis verticais de velocidades longitudinais adimensionais para diferentes alturas relativas para: a) Meio do leito principal; e b) Meio do leito de cheia (Retirada de Yang et al., 2007).....	12
Figura 2.10 - Vectores de correntes secundárias para: a) Fundo liso; e b) Leito de cheia rugoso (relva) (Retirada de Yang et al., 2007).	13
Figura 2.11 - Tensões de Reynolds τ_{xy} (Pa) para: a) Fundo liso; e b) Leito de cheia rugoso (relva) (Retirada de Yang et al., 2007).	14
Figura 2.12 - Uma secção longitudinal do canal vista em planta (Adaptada de Shiono et al., 2009).	15
Figura 2.13 - Distribuição do escoamento secundário numa secção transversal para: a) Leitos de cheia rugosos; e b) Leitos de cheia lisos (Adaptada de Shiono et al., 2009).	15
Figura 3.1 - Canal Veiga da Cunha – LNEC.....	17
Figura 3.2 - Esquema da secção transversal do canal com dimensões.....	18

Figura 3.3 - Sistema de estabilização do escoamento: 1) Chapa metálica; 2) Tijolos cerâmicos furados; 3) Difusores (Tubagens plásticas); 4) Placa de contraplacado de madeira regulável em altura; e 5) Placa de poliestireno.....	19
Figura 3.4 - Sistema de comportas no fim do canal.....	19
Figura 3.5 – Vectrino.....	20
Figura 3.6 – a) Eixos positivos Vectrino; e b) Volume de medição com as respectivas dimensões e distâncias.....	21
Figura 3.7 – Procedimentos de medição com o Vectrino: a) Aplicação de seeding; e b) Vectrino em processo de medição.....	22
Figura 3.8 - Configuração software Vectrino.....	22
Figura 3.9 - Software do Vectrino durante medição.	23
Figura 3.10 - Caudalímetros: 1) Válvula seccionamento tubagem leito principal; 2) Válvula seccionamento tubagem leito de cheia; 3) Caudalímetro leito principal; e 4) Caudalímetro leito de.....	24
Figura 3.11 - Medição das alturas de água: 1) Teodolito; e 2) Hidrómetro.	25
Figura 3.12 - Canal com fundo liso.....	26
Figura 3.13 – a) Canal com fundo rugoso nos leitos de cheia; e b) Pormenor do pano de relva sintética sobre o leito de cheia (perspectiva lateral a partir do leito principal).	26
Figura 3.14 - Secções Transversais e eixos do canal.....	27
Figura 3.15 - Malha de medição - meia secção transversal.....	27
Figura 4.1 - Aplicação do filtro proposto por Goring e Nikora (2002).	31
Figura 4.2 - Perfil vertical de velocidades longitudinais para $Y=90$ (cm) em regime uniforme - $h_r=0,15$ fundo liso.....	32
Figura 4.3 - Distribuição transversal das velocidades longitudinais a 40% da altura de água e da velocidade média segundo o método de integração em profundidade - $h_r=0,15$ em fundo liso na secção X7500.	33
Figura 4.4 - Esquematização da integração realizada para cálculo do caudal escoado numa determinada secção (Retirada de Pinto, 2010).	35
Figura 5.1 - Distribuição transversal das velocidades longitudinais médias em profundidade em regime uniforme - $h_r=0,15$ em fundo liso.	39
Figura 5.2 - Perfis verticais da velocidade longitudinal para $Y=100$ (cm) em regime uniforme - $h_r=0,15$ fundo liso.....	41
Figura 5.3 - Isolinhas da velocidade U/U_s em regime uniforme - $h_r=0,15$ em fundo liso para: a) Secção X3000; b) Secção X5000; e c) Secção X7500 com esquema dos vórtices de eixo horizontal.....	43

Figura 5.4 - Isolinhas das velocidades transversais (cm/s) em regime uniforme - hr=0,15 em fundo liso para: a) Secção X3000; b) Secção X5000; c) Secção X7500.	45
Figura 5.5 - Isolinhas das tensões de Reynolds τ_{xy} (Pa) em regime uniforme – hr=0,15 em fundo liso para: a) Secção X3000; b) Secção X5000; e c) Secção X7500.....	46
Figura 5.6 - Distribuição transversal das velocidades longitudinais a 40% da altura de água e da velocidade média segundo o método de integração em profundidade - hr=0,20 em fundo liso na secção X7500.	47
Figura 5.7 - Distribuição transversal das velocidades médias em profundidade em regime uniforme - hr=0,20 em fundo liso.....	48
Figura 5.8 - Perfis verticais de velocidade longitudinal para Y=100 (cm) em regime uniforme - hr=0,20 fundo liso.....	49
Figura 5.9 - Isolinhas da velocidade U/Us em regime uniforme - hr=0,20 em fundo liso para: a) Secção X3000; b) Secção X5000; c) Secção X7500 com esquema dos vórtices de eixo horizontal.	51
Figura 5.10 - Isolinhas das velocidades transversais (cm/s) em regime uniforme - hr=0,20 em fundo liso para: a) Secção X3000; b) Secção X5000; c) Secção X7500.	52
Figura 5.11 - Isolinhas das tensões de Reynolds τ_{xy} (Pa) em regime uniforme - hr=0,20 em fundo liso para: a) Secção X3000; b) Secção X5000; e c) Secção X7500.....	53
Figura 5.12 - Distribuição transversal das velocidades longitudinais a 40% da altura de água e da velocidade média segundo o método de integração em profundidade - hr=0,30 em fundo liso na secção X7500.	54
Figura 5.13 - Distribuição transversal das velocidades médias em profundidade em regime uniforme - hr=0,30 em fundo liso.....	55
Figura 5.14 - Perfis verticais de velocidade longitudinal para Y=100 (cm) em regime uniforme - hr=0,30 fundo liso.....	55
Figura 5.15 - Isolinhas da velocidade U/Us em regime uniforme - hr=0,30 em fundo liso para: a) Secção X1100; b) Secção X3000; c) Secção X5000; e d) Secção X7500 com esquema do vórtice de eixo horizontal.	57
Figura 5.16 - Isolinhas das velocidades transversais (cm/s) em regime uniforme - hr=0,30 em fundo liso para: a) Secção X1100; b) Secção X3000; c) Secção X5000 com esquema do vórtice de eixo horizontal; e d) Secção X7500.....	58
Figura 5.17 - Isolinhas das tensões de Reynolds τ_{xy} (Pa) em regime uniforme – hr=0,30 em fundo liso para: a) Secção X1100; b) Secção X3000; c) Secção X5000; d) Secção X7500.	60
Figura 5.18 - Distribuição transversal das velocidades médias em profundidade para vários regimes de escoamento não uniforme para a secção X5000 - hr=0,20 em fundo liso.....	62

Figura 5.19 - Isolinhas da velocidade U/U_s para a secção X5000 em regime não uniforme - $h_r=0,20$ em fundo liso para: a) Regime -19% com esquema do vórtice de eixo horizontal; b) Regime Uniforme; c) Regime +19%; d) Regime +38%; e e) Regime +53%.....	64
Figura 5.20 - Isolinhas das velocidades transversais (cm/s) para a secção X5000 em regime não uniforme - $h_r=0,20$ em fundo liso para: a) Regime -19%; b) Regime Uniforme; c) Regime +19%; d) Regime +38%; e e) Regime +53%.	65
Figura 5.21 - Isolinhas das tensões de Reynolds τ_{xy} (Pa) para a secção X5000 em regime não uniforme - $h_r=0,20$ em fundo liso para: a) Regime -19%; b) Regime Uniforme; c) Regime +19%; d) Regime +38%; e e) Regime +53%.	67
Figura 5.22 - Distribuição transversal das velocidades médias em profundidade para vários regimes de escoamento não uniforme para a secção X5000 - $h_r=0,30$ em fundo liso.....	67
Figura 5.23 - Isolinhas da velocidade U/U_s para secção X5000 em regime não uniforme - $h_r=0,30$ em fundo liso para: a) Regime -19% com esquema do vórtice de eixo horizontal; b) Regime Uniforme; c) Regime +19%; d) Regime +38%; e e) Regime +53%.	69
Figura 5.24 - Isolinhas das velocidades transversais (cm/s) para a secção X5000 em regime não uniforme - $h_r=0,30$ em fundo liso para: a) Regime -19%; b) Regime Uniforme; c) Regime +19%; d) Regime +38%; e e) Regime +53%.	70
Figura 5.25 - Isolinhas das tensões de Reynolds τ_{xy} (Pa) para a secção X5000 em regime não uniforme - $h_r=0,30$ em fundo liso para: a) Regime -19%; b) Regime Uniforme; c) Regime +19%; d) Regime +38%; e e) Regime +53%.	72
Figura 5.26 - Distribuição transversal das velocidades a 40% da altura de água e da velocidade média segundo o método de integração em profundidade - $h_r=0,15$ em fundo rugoso na secção X7500.	74
Figura 5.27 - Distribuição transversal das velocidades média em profundidade em regime uniforme - $h_r=0,15$ em fundo rugoso para três secções e $h_r=0,15$ em fundo liso na secção X7500.....	75
Figura 5.28 - Perfis verticais da velocidade longitudinal para $Y=100$ (cm) em regime uniforme - $h_r=0,15$ fundo rugoso.	76
Figura 5.29 - Isolinhas da velocidade U/U_s em regime uniforme- $h_r=0,15$ em fundo rugoso para: a) Secção X3000; b) Secção X5000; c) Secção X7500 com esquema do vórtice de eixo horizontal; d) $h_r=0,15$ fundo liso para a secção X7500.....	78
Figura 5.30 - Isolinhas das velocidades transversais (cm/s) em regime uniforme - $h_r=0,15$ em fundo rugoso para: a) Secção X3000; b) Secção X5000; c) Secção X7500.....	79
Figura 5.31 - Isolinhas das tensões de Reynolds τ_{xy} (Pa) em regime uniforme - $h_r=0,15$ em fundo rugoso para: a) Secção X3000; b) Secção X5000; c) Secção X7500.....	80

Figura 5.32 - Distribuição transversal das velocidades a 40% da altura de água e da velocidade média segundo o método de integração em profundidade - $h_r=0,30$ em fundo rugoso na secção X7500.	81
Figura 5.33 - Distribuição transversal das velocidades médias em profundidade em regime uniforme - $h_r=0,30$ em fundo rugoso para três secções e $h_r=0,30$ em fundo liso na secção X7500.	82
Figura 5.34 - Distribuição transversal das velocidades médias em profundidade em regime uniforme - $h_r=0,15$ e $h_r=0,30$ em fundo rugoso na secção X7500.	82
Figura 5.35 - Perfis verticais de velocidade longitudinal para $Y=100$ (cm) em regime uniforme - $h_r=0,30$ fundo rugoso.	83
Figura 5.36 - Isolinhas da velocidade U/U_s em regime uniforme - $h_r=0,30$ em fundo rugoso para: a) Secção X3000; b) Secção X5000; c) Secção X7500 com esquema de vórtice de eixo horizontal; e d) $h_r=0,30$ fundo liso para a secção X7500.	84
Figura 5.37 - Isolinhas das velocidades transversais (cm/s) em regime uniforme - $h_r=0,30$ em fundo rugoso para: a) Secção X3000; b) Secção X5000; c) Secção X7500.	85
Figura 5.38 - Isolinhas das tensões de Reynolds τ_{xy} (Pa) em regime uniforme - $h_r=0,30$ em fundo rugoso para: a) Secção X3000; b) Secção X5000; e c) Secção X7500.	86
Figura 8.1 - Inserção de corante roxo no escoamento na zona de interface em regime uniforme - $h_r=0,15$ em fundo liso.	93
Figura 8.2 - Inserção de corante roxo no escoamento na zona de interface em regime uniforme - $h_r=0,30$ em fundo liso.	93
Figura 8.3 - Inserção de corante roxo no escoamento na zona de interface em regime uniforme - $h_r=0,15$ em fundo rugoso.	94
Figura 8.4 - Inserção de corante roxo no escoamento na zona de interface em regime uniforme - $h_r=0,30$ em fundo rugoso.	94

Lista de abreviaturas, siglas e símbolos

Símbolo	Significado
A	constante aditiva da lei logarítmica
ADV	Acoustic Doppler Velocimeters
B, B_f	largura do canal
h	altura de água genérica
h_{lc}	altura de água total no leito de cheia
h_{lp}	altura de água total no leito principal
h_r	altura relativa de água
L	leitos de cheia lisos
R	leitos de cheia com rugosidade (relva)
LC	leitos de cheia
LP	leito principal
U	componente da velocidade com direcção coincidente com a direcção do escoamento (longitudinal)
U_p	velocidade média em profundidade
U_{lp}	velocidade no leito principal
U_{lc}	velocidade nos leitos de cheia
U_s	velocidade média na secção transversal
U_*	velocidade de atrito junto ao fundo
U'	componente de flutuação turbulenta da velocidade longitudinal
V	componente da velocidade com direcção perpendicular à direcção do escoamento (transversal)
V'	componente de flutuação turbulenta da velocidade transversal
Q	caudal
S	secção do escoamento

X	posição longitudinal no canal
Y	posição transversal no canal
Z	posição vertical no canal
Pa	pascal (N/m^2)
ΔS	variação da área da secção
κ	constante de Von Kármán
ρ	massa volúmica
τ	tensão tangencial
τ_{xy}	tensão de Reynolds, num plano perpendicular ao eixo do Y e sentido coincidente com o eixo do X .
τ_o	tensão de arrastamento
δs	comprimento genérico do canal
δt	intervalo de tempo
$2D$	duas dimensões (bidimensional)
$3D$	três dimensões (tridimensional)

1 Introdução

1.1 Considerações gerais

Os recursos hídricos que temos à nossa disposição não são, de modo nenhum, alheios ao desenvolvimento demográfico e geográfico que se pode observar no decurso da história humana. Temos como exemplos os rios e ribeiras que convivem lado a lado com as populações. Estes recursos servem de ferramentas para suplantarem as necessidades humanas, sendo importantes como uma via fluvial para transportes, para rega de plantações, para consumo e para a existência de um clima mais temperado. Uma prova desta proximidade é o desenvolvimento de grandes cidades ao longo das margens de rios.

Torna-se assim relevante a importância dos rios para uma melhor qualidade e condições de vida, por isso tanto esforço tem sido realizado de forma a estudar os fenómenos e factos associados aos mesmos. Com um conhecimento mais profundo e consistente desta matéria, pode-se definir com mais precisão mapas de inundação, por exemplo. Factos que possibilitarão às entidades competentes, realizar projectos mais informados, mais seguros, com menos esforço financeiro e que favoreçam mais as populações, podendo, ao mesmo tempo, preservar áreas que já se encontrem ocupadas.

Neste trabalho de investigação procura estudar-se a capacidade de vazão dos rios quando estes atingem a sua capacidade máxima no leito principal, onde maior parte do seu escoamento se processa, e passa também a haver escoamento nos leitos de cheia. Este fenómeno é muitas vezes imprevisível, porque ocorre principalmente aquando de precipitação intensa e de alguma duração, levando a que seja necessário a adopção de medidas preventivas para que seja diminuído o risco de danos tanto a pessoas como a infraestruturas, com base na previsão dos níveis de cheia.

Quando um rio transborda passa a ter, simultaneamente, escoamento nos seus leitos de cheia e leito principal, surge assim, uma configuração de secção transversal do rio, composta (Figura 1.1), gerando-se um gradiente de velocidades, mais elevada no leito principal e menor nos leitos de cheia. Este processo resulta numa perda de energia por parte do escoamento no leito principal, acarretando uma menor capacidade de vazão do rio, e, consequentemente, ao desenvolvimento de cheias.

Nas últimas décadas foram realizados diversos estudos, experimentais, analíticos e numéricos, sobre escoamentos em canais com secção composta. Na sua maioria é assumida a condição de regime uniforme e os leitos de cheia são considerados lisos. Tendo em conta que na natureza o escoamento raramente se processa em regime uniforme e que geralmente os leitos de cheia apresentam

rugosidade muito superior à do leito principal, torna-se importante estudar a influência deste tipo de condições na estrutura turbulenta do escoamento e, conseqüentemente, na capacidade de vazão de uma secção composta.

Assim, na presente dissertação efectua-se um estudo experimental de escoamento em canais de secção composta em regime uniforme e não uniforme, e com leitos de cheia lisos e rugosos.

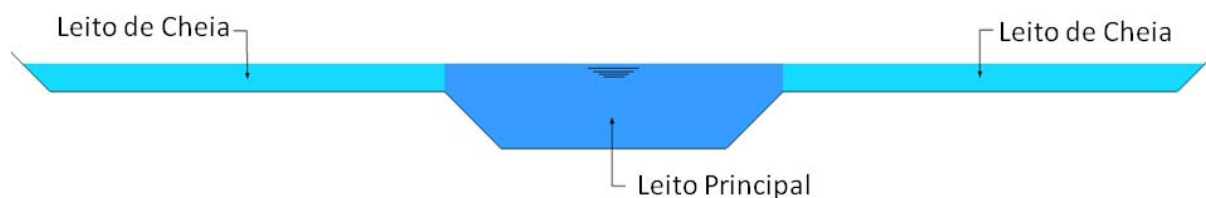


Figura 1.1 - Configuração da secção transversal (composta) do rio.

1.2 Objectivos

Após ter sido apresentado o tema e o contexto desta dissertação, indicam-se os objectivos que lhe servem de base.

O trabalho desenvolvido tem como objectivo a caracterização experimental da influência do regime não uniforme e da rugosidade dos leitos de cheia, na estrutura turbulenta do escoamento num rio, quando se verifica fluxo de água simultaneamente no leito principal e nos leitos de cheia.

Foi dada especial atenção à zona da interface que se desenvolve entre o escoamento dos leitos de cheia e do leito principal, pois é nesta região que se dá a transição entre as velocidades em cada leito e se desenvolvem interacções entre os escoamentos, resultando numa transferência de massa e de quantidade de movimento, sendo, por isso, uma zona propícia ao surgimento de estruturas de origem turbulenta, tal como vórtices de eixo vertical, e, por conseguinte, uma zona de especial interesse para ser investigada. A anisotropia gerada pelas fronteiras sólidas do canal, que resulta em correntes secundárias, será também sujeita a análise.

Sendo assim, definiu-se um modelo padrão que é definido por um regime de escoamento uniforme, onde o leito principal e os de cheia se apresentam sem relva (fundo liso). Posteriormente serão comparados com leitos de cheia cobertos com relva (fundo rugoso) e leitos de cheia lisos em vários regimes não uniformes.

1.3 Organização da dissertação

Neste subcapítulo apresenta-se a estrutura definida para esta dissertação.

Neste primeiro capítulo, pretende-se contextualizar e fazer uma introdução ao tema, fazendo uma ponte entre um trabalho experimental num ambiente controlado e o que acontece no mundo real numa escala maior. Ao mesmo tempo são apresentados os objectivos que norteiam o trabalho desenvolvido.

Antes de ser iniciada a apresentação dos resultados obtidos, torna-se importante apresentar no capítulo 2 uma revisão bibliográfica de modo a que todos os conceitos sejam entendidos e contextualizados.

No terceiro capítulo é caracterizada e definida tanto a instalação experimental como os procedimentos utilizados, que serviram de base prática e científica para esta dissertação.

A forma como foram processados os dados recolhidos experimentalmente é explicitada no capítulo 4.

No capítulo 5 são apresentados e analisados todos os dados recolhidos, que se desenvolvem em dois conjuntos: leitos de cheia lisos e rugosos, sendo o primeiro ainda subdividido em escoamentos uniformes e não uniformes.

Estão reunidas no capítulo 6 as principais conclusões retiradas do trabalho desenvolvido e apresentam-se sugestões para futuras investigações em temas científicos similares.

2 Revisão bibliográfica

2.1 Escoamento uniforme em canais com secção composta com fundo liso

Uma das condições impostas no desenvolvimento do trabalho experimental inserido no tema desta dissertação consiste num escoamento em regime uniforme, que se desenvolve num fundo liso de cimento, cuja secção transversal se torna composta quando se processa a inundação das planícies de cheia. Posto isto torna-se importante clarificar, objectivamente, todos os conceitos teóricos que lhe servem de base.

O conceito de secção composta, não pode ser dissociado de um outro designado por altura relativa, que, no decorrer do trabalho experimental, definiu diferentes condições de recolha de dados, possibilitando a comparação de resultados. A altura relativa refere-se a uma razão entre a altura de água no leito de cheia, h_{lc} , e a altura de água do leito principal, h_{lp} , da seguinte forma:

$$h_r = \frac{h_{lc}}{h_{lp}} < 1 \quad (2.1)$$

O regime uniforme, que foi implementado, significa que a velocidade, com direcção e sentido coincidente com o eixo X positivo do canal, não vai variar em grandeza, direcção ou sentido, ao longo de toda a extensão longitudinal do canal. Se forem analisadas todas as secções transversais do modelo, tais condições terão de permanecer inalteradas. O mesmo é dizer que, a altura de água, o caudal e a velocidade se mantêm constantes ao longo do canal, garantindo-se, ao mesmo tempo, que a superfície livre do escoamento se mantém paralela ao fundo do canal.

Para este tipo de escoamento, e onde existe uma superfície livre paralela ao fundo do canal, vai existir desenvolvimento da camada limite. Esta está relacionada com o desenvolvimento da gama de velocidades verticais do escoamento e com a forma como o fundo as influencia. Nas zonas onde as superfícies sólidas se encontram em directo contacto com o fluido a velocidade deste é nula, independentemente do tipo de rugosidade das primeiras. Nessa medida, na vizinhança das superfícies sólidas, mais quantidade de fluido vai sendo retardado à medida que o mesmo se desloca, ocorrendo, simultaneamente, o aumento da camada limite. Quanto mais a jusante se encontrar o escoamento, face ao ponto inicial de contacto entre o fluido e a superfície, mais o perfil vertical de velocidades do escoamento vai sendo deformado, devido à influência, cada vez mais sentida, do fundo. Ao mesmo tempo, quanto maior a distância à superfície sólida, maior a velocidade. No início do canal o escoamento é laminar, mas com o alargamento da camada limite, este torna-se turbulento. A transição de um regime para o outro dá-se na região de transição (Figura 2.1).

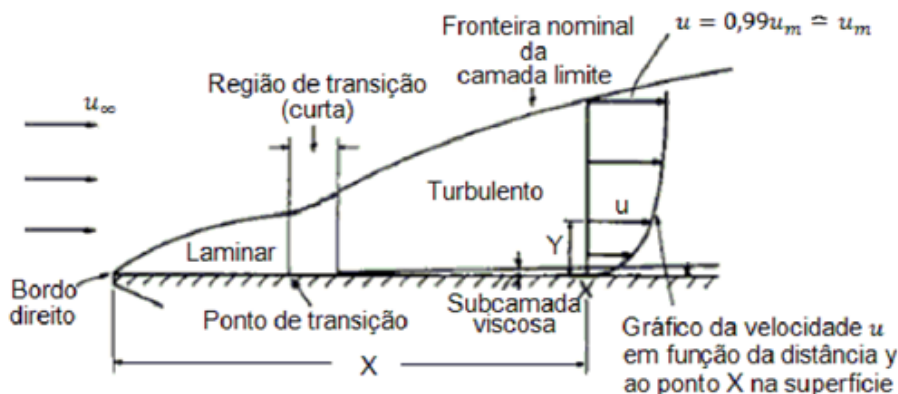


Figura 2.1 - Desenvolvimento da camada limite sobre uma superfície sólida (Adaptada de Massey, 2002).

A inundação das planícies de cheia no decorrer do escoamento comporta novos condicionalismos à capacidade de vazão dos rios. Ao invés do que ocorre quando existe somente escoamento no leito principal, onde se tem um escoamento com uma gama de velocidades, passa a existir, agora, a influência de um outro escoamento, que se desenvolve sob condicionalismos diferentes, quer seja em termos de uma menor altura de água, quer nas características do respectivo fundo onde se escoar, que resultam em menores velocidades de escoamento, que vão influenciar directamente o escoamento no leito principal, retardando-o, diminuindo dessa forma a capacidade total de descarga do rio. Surge, desta forma, um escoamento em secção composta, com uma altura de água maior no leito principal e, outra, menor no leito de cheia.

Esta interacção entre os escoamentos nos dois leitos introduz novos desafios à caracterização do escoamento, pois, traz consigo novos fenómenos que terão de ser considerados, tal como a transferência de massa e de quantidade de movimento entre os dois leitos que vão dissipar a energia do escoamento, para além daquela gerada pelo atrito do fundo (Shiono e Knight, 1991), reduzindo a capacidade de vazão do canal.

A presença de vórtices de eixo vertical na interface entre os dois leitos está na origem da camada de mistura, que consiste numa zona de tensão transversal resultante da interacção directa entre dois escoamentos contíguos que se deslocam a velocidades diferentes. Na Figura 2.2 é possível observar-se o desenvolvimento da referida camada de mistura, de montante para jusante. A distribuição das velocidades longitudinais no início do canal, para cada leito, é a que se encontra na Figura 2.2 (a), onde se verifica a não interacção entre os escoamentos em cada um dos leitos no instante inicial. À medida que a água se escoar longitudinalmente no canal, a interacção entre os dois escoamentos e as respectivas distribuições de velocidades apresentam um comportamento padronizado (Figura 2.2 (b)), que se norteia pelo alargamento da camada de mistura nesta região onde

os dois escoamentos se encontram. Nessa medida, vai existir uma diminuição do gradiente de velocidades entre os dois escoamentos, com uma diminuição das velocidades no leito principal e um aumento das velocidades no leito de cheia (Figura 2.2 (b)), na região onde a água de cada um dos leitos interage.

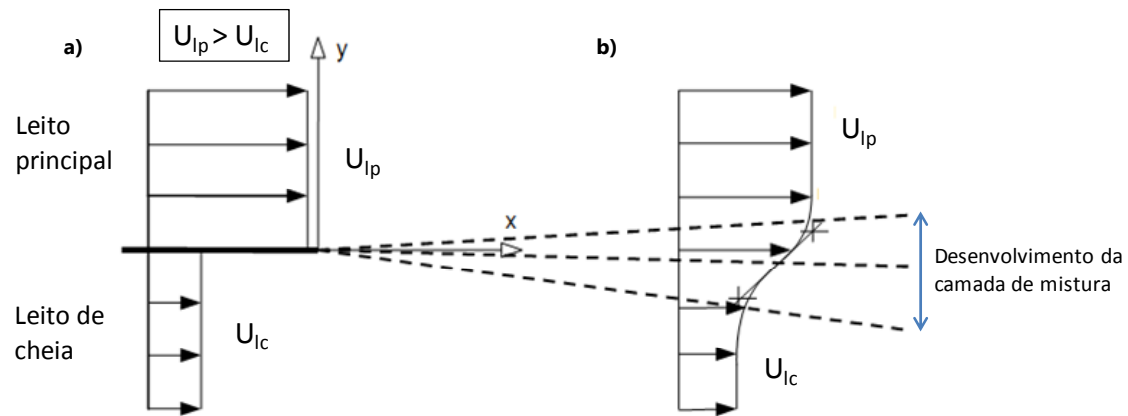


Figura 2.2 - Desenvolvimento da camada de mistura na interface do leito principal e leitos de cheia para:
a) Posição no início do canal; e b) Posição a jusante do início do canal (Adaptada de Nijs, 2003).

Na zona de interface, onde os dois leitos se cruzam, surgem vórtices de eixo vertical resultantes da diferença de velocidades verificada. O sentido destes vórtices, contrário ao dos ponteiros do relógio, é definido a partir da maior velocidade do leito principal e da menor no leito de cheia (Figura 2.3).

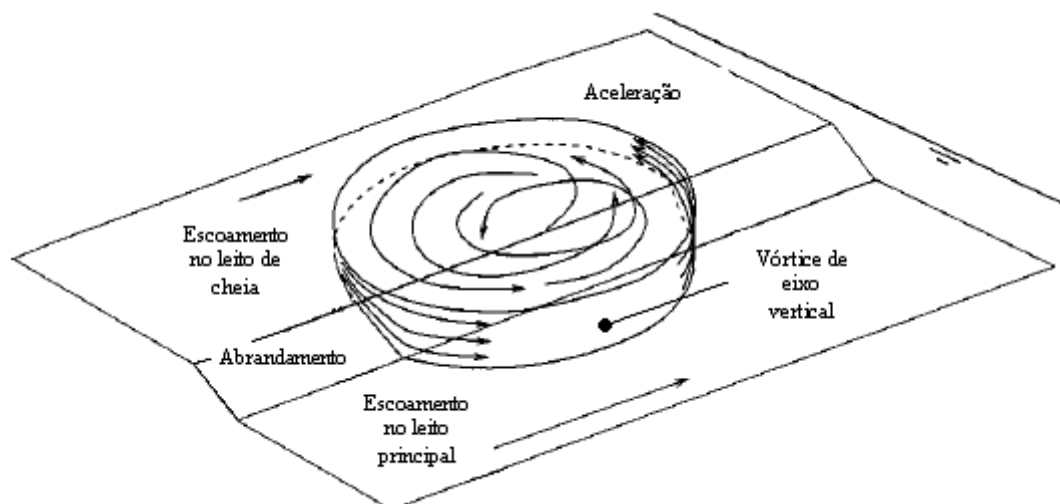


Figura 2.3 - Esquema dos vórtices de eixo vertical e horizontal verificados na interface LC-LP
(Adaptada de Prooijen et al., 2005).

Associado ao comportamento descrito no parágrafo anterior, está o trabalho desenvolvido por Shiono e Knight (1991), que no decorrer da sua investigação, apresentaram um esquema da estrutura turbulenta de um canal de secção composta (Figura 2.4), que, desde então, tem norteado os estudos sobre escoamentos em canais de secção composta.

Pode-se observar na Figura 2.4 a presença dos vórtices de eixo vertical apresentados na Figura 2.3, mas também vórtices de eixo horizontal coincidente com a direcção do escoamento, denominadas por correntes secundárias, que são o resultado da turbulência anisotrópica induzida pelas fronteiras sólidas. Todos estes fenómenos apontam para um comportamento 3D que não poderá ser ignorado, de forma a ser feita uma boa e completa caracterização deste tipo de escoamentos (Nezu, 1994).

Relativamente às velocidades, a Figura 2.4, possibilita a percepção de como estas se comportam, tanto transversalmente como em profundidade. Verifica-se desta forma que ao longo da secção transversal do canal as velocidades são substancialmente inferiores no leito de cheia quando comparadas com as presentes no leito principal, havendo valores máximos de velocidade no centro do canal. A influência do atrito do fundo está também demonstrada no esquema, sendo representadas velocidades locais inferiores quando a profundidade de medição se encontra mais perto do fundo.

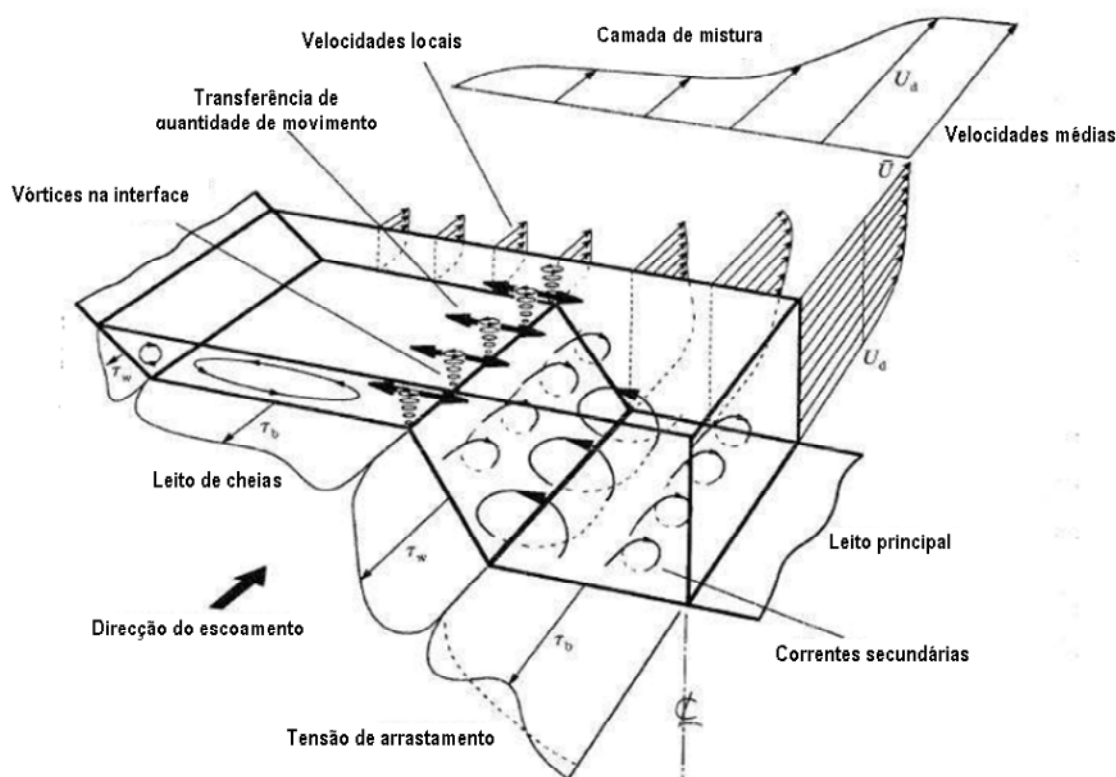


Figura 2.4 - Estrutura turbulenta de um escoamento em secção composta (Adaptada de Shiono e Knight, 1991).

2.2 Escoamento não uniforme em canais com secção composta com fundo liso

O subcapítulo anterior referiu-se ao regime uniforme, que normalmente não se encontra em situações reais, além disso, o regime uniforme para ser completamente verificado há a necessidade de existir uma extensão mínima do canal na qual seja atingido um desenvolvimento e um equilíbrio do escoamento suficientes, no sentido de ser estabelecido um regime uniforme na sua totalidade (Massey, 2002). Na maioria dos estudos realizados recorre-se a este tipo de regime, por tratar-se de uma abordagem mais simplificada e simples aos problemas que se pretendem estudar.

No entanto, a condição de escoamento que surge na maior parte das situações é a de regime não uniforme, que se caracteriza pela variação dos seus parâmetros ao longo do sentido do escoamento, tais como a velocidade (U) e a altura de água (h).

Recentemente, em virtude do regime não uniforme ser a situação que mais se encontra na realidade, têm surgido estudos que se centram em condições de escoamento não uniformes. Um dos mais importantes foi o desenvolvido por Bousmar *et al.* (2005), que sugeriu uma alimentação independente para cada um dos leitos, em canais com secção composta, como resposta ao facto de, numa alimentação clássica, sem separação da alimentação, a altura de água inicial ser igual nas duas subsecções, resultando em velocidade e altura cinética, $U^2/(2 \times g)$, iguais, levando a um excessivo escoamento de água por parte do leito de cheia em secções a montante, que, nessa medida, não vai de encontro a um escoamento uniforme, existindo transferência de massa para o leito principal. Posto isto, pode-se afirmar que existe um desequilíbrio no sentido de se estabelecer um correcto regime uniforme, podendo ter existido alguns trabalhos experimentais que, devido à inexistente separação de alimentação inicial, tenham induzido características não uniformes ao escoamento, indesejadamente. Existindo uma separação inicial da alimentação para cada um dos leitos, minimizam-se as hipóteses do escoamento sofrer distúrbios e transferência de massa, possibilitando um desenvolvimento do escoamento mais consistente e correcto, de acordo com o regime imposto.

O estudo de Bousmar *et al.* (2005) permite aferir também sobre o comportamento dos regimes não uniformes, que são alcançados aumentando a percentagem de alimentação de caudal para o leito de cheia ou para o leito principal, mantendo, rigorosamente, o caudal total definido para regime uniforme. Desta forma, ter-se-á uma transferência de massa e de quantidade de movimento entre os leitos, resultante em grande parte de maiores diferenças de velocidades e de alturas de água, que irão afectar o comportamento do escoamento, nomeadamente, o desenvolvimento da camada de mistura e limite. Nessa medida, verificam-se ainda variações da tensão aparente, devido ao aumento

de transferências de massa entre as subsecções (Fernandes *et al.*, 2011), à difusão de turbulência ao longo do canal, relacionada também com variações de velocidade, e de alturas de água longitudinais.

Proust *et al.* (2010) realizou um trabalho experimental relacionado com perdas de energia em canais com secção composta, prismáticos e não prismáticos, sob regime de escoamento não uniforme, com diferentes percentagens de sobrealimentação no leito de cheia. Esta abordagem permite estudar características que são aquelas que tipicamente se encontram na realidade, ou seja, um regime de escoamento não uniforme e um canal cujas subsecções apresentam variações na geometria da respectiva secção transversal. A Figura 2.5 ilustra uma das geometrias do canal que foi utilizada neste estudo.

Este estudo permitiu concluir onde a perda energia é mais elevada e que é diferente para cada um dos leitos, para várias condições de escoamento, quer seja para diferentes alturas relativas de água, quer para diferentes tipos de geometrias das secções, sendo efectuadas comparações entre essas características, tanto em regime uniforme como em não uniforme.

Demonstram-se quais os processos responsáveis pela maior perda de energia. No caso de um regime uniforme o atrito do fundo e as trocas de massa, devido a turbulência e correntes secundárias, dissipam a maior parte da energia. Analisando os resultados obtidos para regimes não uniformes, numa geometria similar àquela encontrada no canal utilizado para o desenvolvimento da presente dissertação, além de existir perda de energia através do atrito gerado pelo fundo no escoamento, é relevante o papel das trocas de massa por turbulência na interface, e não tanto o papel das correntes secundárias, principalmente para alturas relativas até 0,30. Para alturas relativas mais elevadas a dissipação de energia perde intensidade sob as condições descritas.

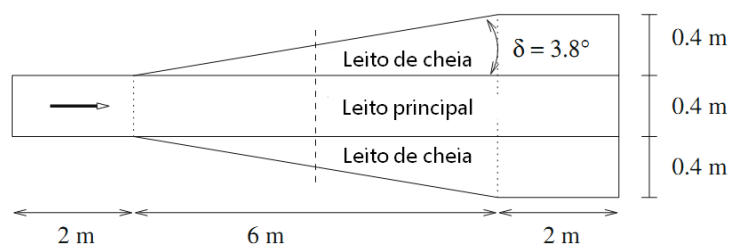


Figura 2.5 - Exemplo de configuração do canal vista em planta com leitos de cheia divergentes (Adaptada de Proust *et al.*, 2010).

A instalação utilizada para o desenvolvimento dos procedimentos experimentais presentes nesta dissertação, proposta por Bousmar *et al.* (2005), apresenta as características e alimentação

esquematizadas nas Figura 2.6 e Figura 2.7, permitindo obter resultados mais fidedignos e que correspondem correctamente aos regimes impostos.

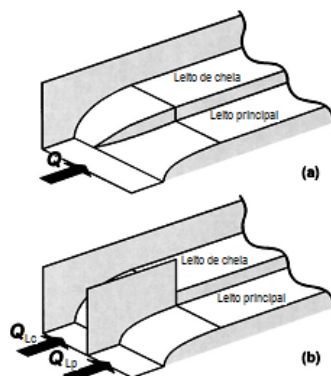


Figura 2.6 - Esquema de alimentação para canal de secção composta: a) Alimentação do canal sem separação entre os dois leitos; e b) Alimentação do canal separada para cada um dos leitos (Adaptada de Bousmar *et al.*, 2005).

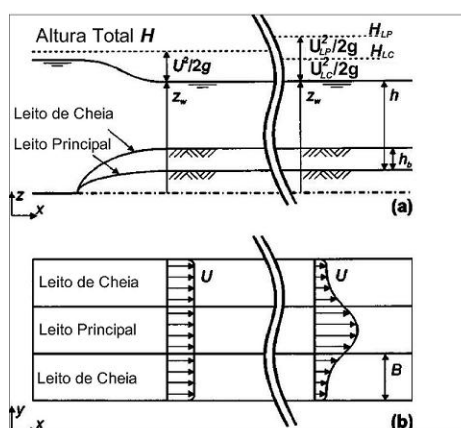


Figura 2.7 - Altura cinética e perfil de velocidades num canal sem separação da alimentação de caudais iniciais, visto no início do canal e a uma distância a jusante. a) vista lateral b) vista em planta (Adaptada de Bousmar *et al.*, 2005).

2.3 Escoamento uniforme em canais com secção composta com fundo rugoso

Em determinadas circunstâncias, as planícies de inundação dos rios encontram-se preenchidas por diversos tipos de vegetação, que se apresentam como obstáculos ao escoamento que se processa nestes leitos aquando da ocorrência de cheias. Desta forma vão influenciar a distribuição das velocidades, e assim a capacidade de vazão dos rios.

Um estudo desenvolvido nesta temática foi realizado por Yang *et al.* (2007). Nesta investigação experimental foi introduzida rugosidade no leito de cheia através de diversos tipos de vegetação

(relva, pequenos arbustos e árvores), operando num regime uniforme de escoamento. Quando colocada rugosidade no leito de cheia, o leito principal revelou velocidades mais elevadas, comparadas com os valores obtidos para leito de cheia liso. Seguindo o caminho contrário o leito de cheia apresentou velocidades mais baixas, devido à resistência oferecida pela rugosidade imposta. As isolinhas das velocidades (U) medidas são apresentadas na Figura 2.8.

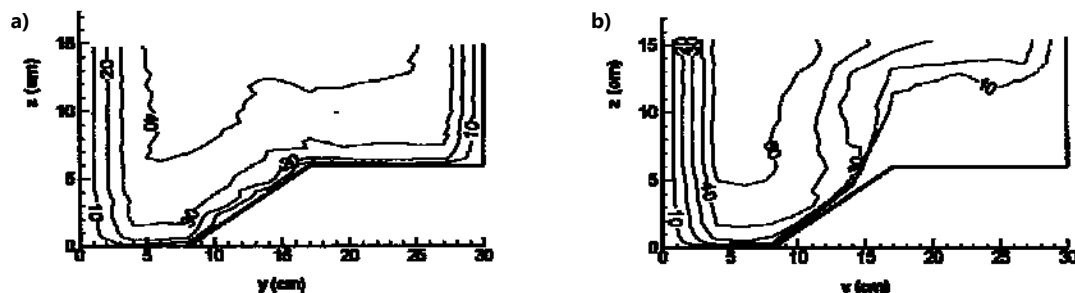


Figura 2.8 - Velocidades longitudinais (cm/s): a) fundo liso; b) e fundo rugoso (relva) (Retirada de Yang *et al.*, 2007).

Yang *et al.* (2007) concluíram também que, diferentes tipos de vegetação nas planícies de inundação retardam o escoamento com diferentes intensidades, sendo a relva a responsável por valores de velocidade mais baixos, quando comparada com rugosidade feita com árvores ou arbustos.

Os perfis verticais de velocidade, para diferentes alturas relativas entre os dois leitos, foram também alvo de análise por parte de Yang *et al.* (2007). Na Figura 2.9 apresentam-se os resultados desse estudo. Independentemente da subsecção analisada, quando o leito não apresenta vegetação, o perfil vertical de velocidades desenvolve-se segundo um padrão logarítmico. Todavia, observando o perfil a meio do leito de cheia com a presença de vegetação, o seu comportamento é algo irregular e em forma semelhante a um "S".

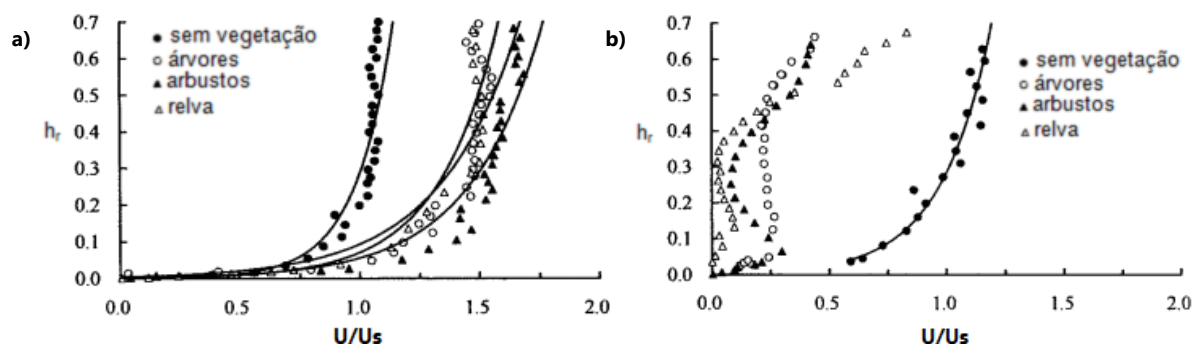


Figura 2.9 – Perfis verticais de velocidades longitudinais adimensionais para diferentes alturas relativas para: a) Meio do leito principal; e b) Meio do leito de cheia (Retirada de Yang *et al.*, 2007).

Nos leitos de cheia rugosos, o perfil (Figura 2.9) apresenta-se com um desenho mais regular e perto de um padrão logarítmico. De referir ainda o facto que, as velocidades no leito principal são maiores para condições de leitos de cheia rugosos, e no leito de cheia esses valores são mais baixos, fazendo a comparação com o fundo liso nos dois leitos, corroborando o que se verificou nas isolinhas da velocidade (Figura 2.8).

Na Figura 2.10 são apresentados os vectores de correntes secundárias identificadas em Yang *et al.* (2007), tanto para fundo liso como para fundo rugoso, com relva, no leito de cheia. A influência do fundo rugoso vai-se reflectir intensamente na estrutura das correntes secundárias. No leito de cheia verifica-se uma menor ocorrência de vórtices, mas quando se começa a entrar no leito principal as estruturas tornam-se mais complexas, principalmente na interface dos dois escoamentos.

A introdução de vegetação no leito de cheia tem como consequência o aumento do gradiente lateral das velocidades, fazendo com que a tensão aparente na interface vertical entre os dois leitos aumente também (Yang *et al.*, 2007), e a diminuição das velocidades longitudinais no leito de cheia resulta numa menor tensão de arrastamento.

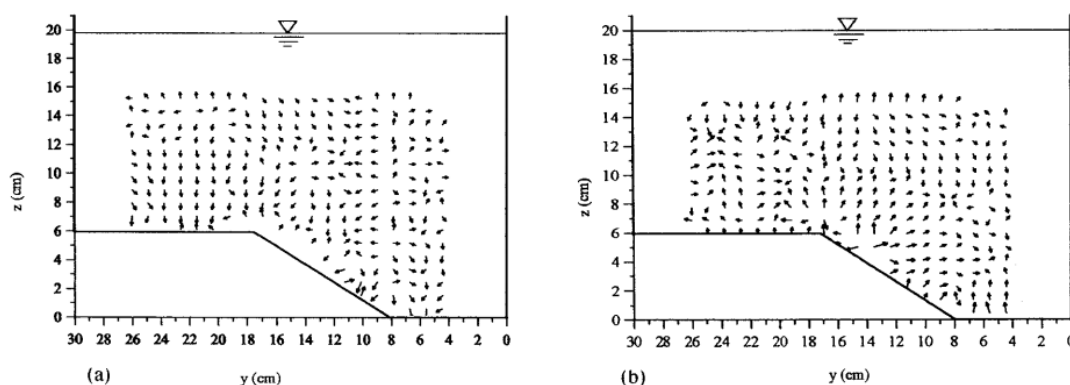


Figura 2.10 - Vectores de correntes secundárias para: a) Fundo liso; e b) Leito de cheia rugoso (relva) (Retirada de Yang *et al.*, 2007).

Com o propósito de caracterizar devidamente o escoamento no canal, nomeadamente, a interação entre o escoamento em cada um dos leitos, Yang *et al.* (2007), apresenta as Tensões de Reynolds (τ_{xy}), em toda da largura da secção transversal no eixo Y , a diferentes cotas no eixo do Z , tanto para fundo liso (a), como fundo rugoso (b).

Devido ao facto da água no leito de cheia se escoar a uma velocidade substancialmente mais baixa do que no leito principal, principalmente se o primeiro estiver coberto por vegetação, gera-se uma zona de tensões na interface entre os dois escoamentos, bem visível na Figura 2.11. O facto de

serem verificadas maiores velocidades no leito principal face a menores no leito de cheia em fundo rugoso, não é alheio à distribuição das tensões de Reynolds, pois esta maior diferença de velocidades dos dois escoamentos, resulta na presença de tensões substancialmente superiores na sua interface. A vegetação induz ainda tensões negativas na vertente inclinada no leito principal, algo que não acontece em fundo liso.

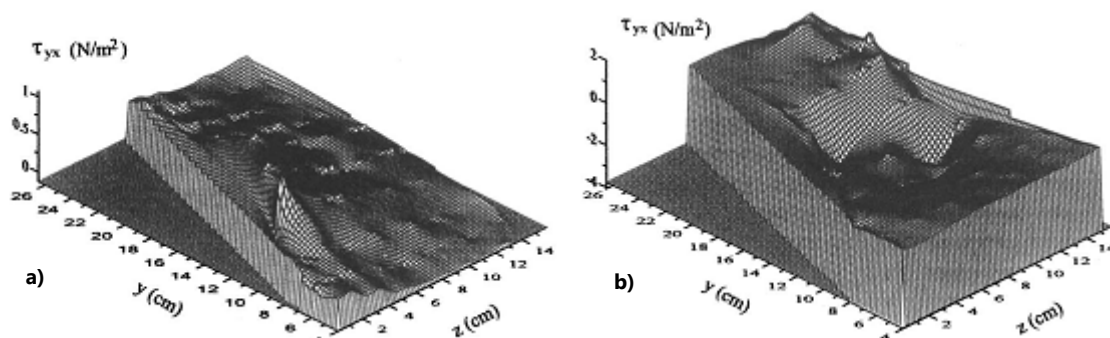


Figura 2.11 - Tensões de Reynolds τ_{yx} (Pa) para: a) Fundo liso; e b) Leito de cheia rugoso (relva) (Retirada de Yang *et al.*, 2007).

Um rio, na realidade, não apresenta, usualmente, um canal prismático com um desenho, em planta, recto. Nesse sentido Shiono *et al.* (2009) num estudo experimental, explorou e analisou um modelo de um rio com curvas ao longo do seu desenvolvimento longitudinal (Figura 2.12), com leitos de cheia lisos e rugosos, em regime uniforme, dando importância a parâmetros relacionados com taxas de transporte de sedimentos e à forma como o fundo se vai moldando ao escoamento, identificando ainda correntes secundárias através das velocidades transversais à direcção do escoamento (Figura 2.13).

Através da análise dos dados e de comparações entre leitos de cheia lisos e rugosos, com a mesma altura relativa ($h_r=0,45$), Shiono *et al.* (2009) verificaram que a velocidade, em termos médios, nos leitos de cheia rugosos é menor do que com leitos de cheia lisos, observando o mesmo para o canal principal, que apresenta assim uma capacidade de vazão menor. Afirma também que este retardamento no canal principal se deve à baixa velocidade da água que se escoar no leito de cheia, que ao entrar em contacto com o leito principal, retarda-o. Recolheram dados no canal com leitos de cheia rugosos para uma altura relativa maior ($h_r=0,55$). Feita a comparação com os dados para leitos de cheia lisos para uma altura relativa menor ($h_r=0,45$), as velocidades no caso de leitos de cheia rugosos apresentam-se ainda assim menores, mesmo com uma altura relativa de água maior. O que demonstra o efeito da vegetação na capacidade de vazão do canal.

No que respeita ao desenvolvimento de correntes secundárias, estas foram identificadas a profundidades mais elevadas, à medida que a rugosidade nas planícies de inundação aumenta.

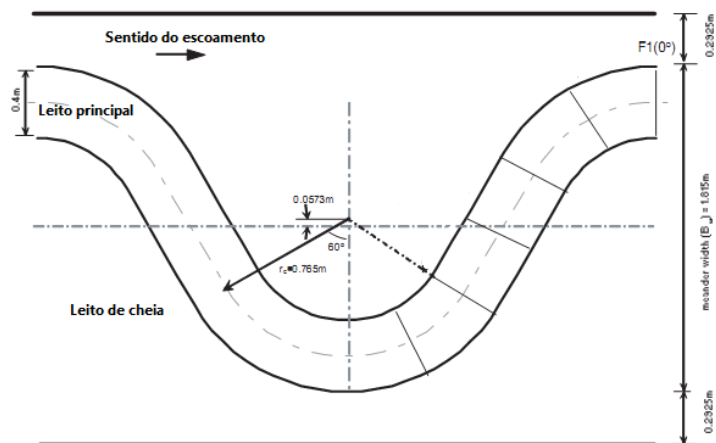


Figura 2.12 – Uma secção longitudinal do canal vista em planta (Adaptada de Shiono *et al.*, 2009).

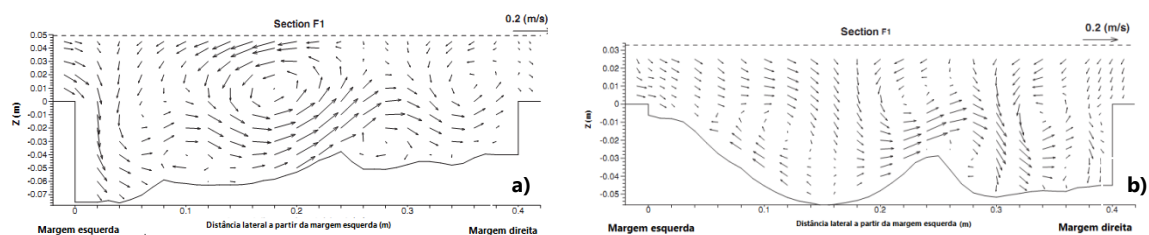


Figura 2.13 – Distribuição do escoamento secundário numa secção transversal para: a) Leitos de cheia rugosos; e b) Leitos de cheia lisos (Adaptada de Shiono *et al.*, 2009).

3 Procedimento e Instalação experimental

3.1 Canal de secção composta

A recolha de dados, a fim de desenvolver este trabalho, decorreu nas instalações do *LNEC*, no Departamento de Hidráulica (DHA), no Núcleo de Recursos Hídricos e Estruturas Hidráulicas (NRE), utilizando o Canal Veiga da Cunha (Figura 3.1), que está fisicamente instalado no pavilhão de Hidráulica Fluvial, que consiste num canal prismático de um rio com secção composta, existindo um leito principal e dois de cheia. Torna-se assim esta instalação numa importante ferramenta para o completo estudo dos fenómenos que ocorrem durante o escoamento de um rio, nomeadamente, a interacção entre leitos de cheia e leito principal.



Figura 3.1 - Canal Veiga da Cunha – LNEC.

Ao longo deste capítulo a instalação experimental, bem como o método experimental e instrumentos de medição utilizados, serão caracterizados e descritos.

O referido canal apresenta um comprimento longitudinal de 10 m e uma largura de 2 m e declive longitudinal de 0,0011 m/m, ao longo da qual apresenta uma secção transversal simétrica e constante em toda a extensão do eixo *X* do modelo. Para melhor definir a secção transversal do modelo, bem como as suas dimensões, apresenta-se a Figura 3.2.

Na Figura 3.1 é ainda possível verificar uma estrutura assente em carris, que circula livremente em toda a extensão longitudinal do canal, sendo desta forma possibilitada a medição e análise de diferentes secções transversais ao longo de todo o modelo. Importa referir que, colinearmente com os carris está colocada uma régua, que permite saber o local de cada uma das secções que se pretendem medir.

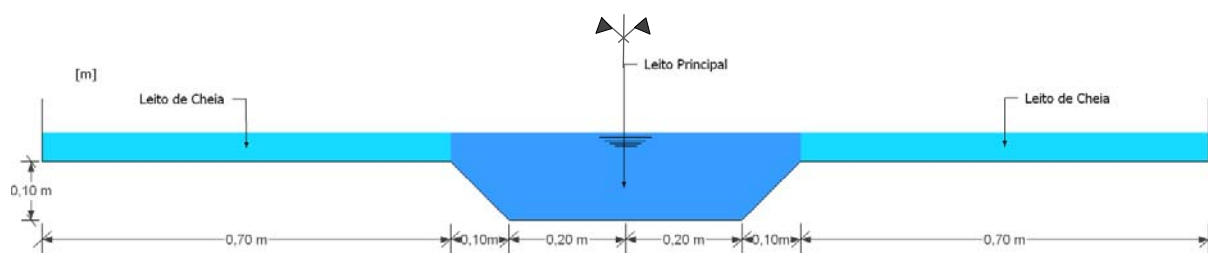


Figura 3.2 - Esquema da secção transversal do canal com dimensões.

De modo a alimentar-se o canal, existe um reservatório elevado que o alimenta graviticamente. Nas instalações pode-se verificar também a existência de um reservatório subterrâneo que, através de 2 bombas, leva a água até ao reservatório elevado, previamente mencionado. Este reservatório subterrâneo por sua vez é alimentado pela água que já percorreu o canal. Deste modo constata-se um circuito fechado, que permite a alimentação constante e ininterrupta do canal, utilizando sempre a mesma quantidade de água.

No local inicial de alimentação do canal, seguindo o modelo de alimentação proposto por Bousmar *et al.* (2005) (Figura 2.6 e Figura 2.7), existe uma separação da alimentação e uma transição feita através de uma zona curva até se chegar aos leitos em si (Figura 3.3). Além disso foram implementados sistemas de estabilização de escoamento entre as tubagens de alimentação provenientes do reservatório elevado e o início dos leitos do canal. A necessidade de estabilizar o escoamento antes de este chegar aos leitos, prende-se com o facto de o canal ter uma extensão limitada, que poderá impossibilitar o equilíbrio, antes do fim do canal, de alguns distúrbios no seu ponto mais a montante. Desta forma qualquer medida que antecipe destabilizações e transferências de massa desnecessárias e não naturais é positiva, no sentido de se obterem resultados com melhor qualidade.

Em primeiro lugar, os tijolos furados e a pilha de tubos de plástico (Figura 3.3) direccionam o escoamento de uma forma uniforme, no sentido transversal do escoamento, sendo também responsáveis por uma perda de carga devido à resistência e acumulação de água por estes realizada.

Por fim, antes da água chegar aos leitos do canal, foram colocadas placas de poliestireno antes do início dos leitos de cheia e uma placa de contraplacado de madeira regulável (Figura 3.3) em altura no caso do leito principal, que pretendem estabilizar a superfície livre da água escoada, minimizando a ocorrência de ondulação.

A fim de ser mantida uma altura de água que permitisse que as condições impostas para medição fossem as correctas, no fim do canal encontra-se presente um sistema de comportas ajustável, como se pode verificar na Figura 3.4.

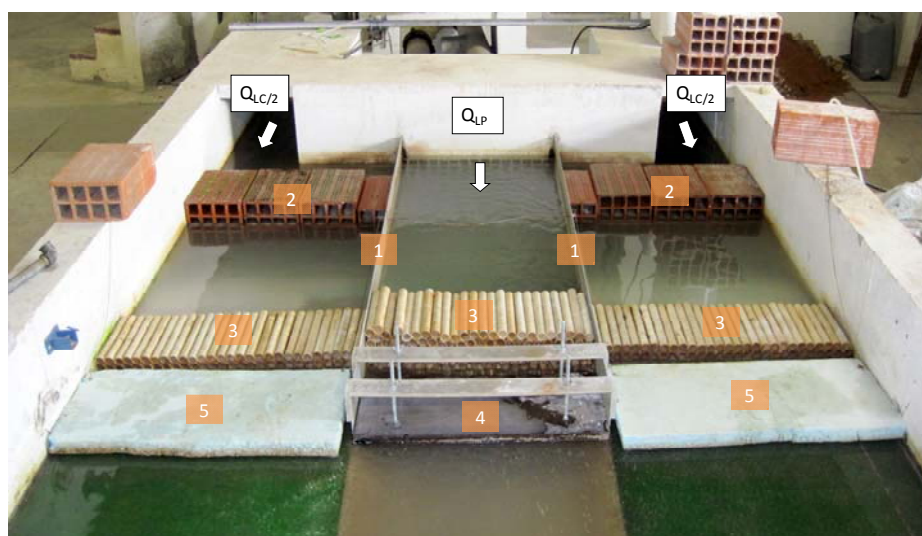


Figura 3.3 - Sistema de estabilização do escoamento: 1) Chapa metálica; 2) Tijolos cerâmicos furados; 3) Difusores (Tubagens plásticas); 4) Placa de contraplacado de madeira regulável em altura; e 5) Placa de poliestireno.



Figura 3.4 - Sistema de comportas no fim do canal.

3.2 Equipamentos de medição e controlo

3.2.1 Vectrino

A recolha de dados de velocidade nos diversos ensaios realizados foi realizada através de um velocímetro, denominado *Vectrino* (Figura 3.5), que se insere na categoria dos *ADV* (*Acoustic Doppler Velocimeters*), sendo mais especificamente um *Micro ADV*, derivado das suas dimensões relativamente pequenas. Este aparelho permite medir velocidades instantâneas dentro de água recorrendo ao efeito Doppler.



Figura 3.5 – Vectrino.

Este efeito tem por base a mudança de frequência da onda de som que se verifica quando um observador estático recebe a frequência de onda de um emissor em movimento que passa por si. Ao aproximar-se do observador a frequência que este recebe é maior do que aquela que está a ser realmente emitida pelo emissor, quando o emissor passa mesmo à frente do observador a frequência emitida e recebida é igual, e quando, por fim, o emissor ultrapassa o receptor a frequência que este último recebe é inferior àquela que é efectivamente emitida. Utilizando entre princípio e esta diferença de frequências verificada antes e depois do emissor passar o observador estático, pode-se determinar a velocidade instantânea do emissor da onda.

O *Vectrino* recorre a este efeito para determinar a velocidade instantânea da água. Para tal emite uma curta onda de som através do seu transdutor central para um volume de medição com uma forma cilíndrica, que se encontra a cerca de 5 centímetros de distância, como indicado na Figura 3.6. Esta onda é por sua vez reflectida em partículas suspensas na água, e chega sob a forma de um eco aos seus 4 receptores (Figura 3.6 (a)) nessa altura mede mudanças verificadas na frequência emitida e recebida, e determina a velocidade instantânea. O *Vectrino* é um sonar bi-estático, ou seja, existe uma separação entre o canal de emissão da onda e o canal de recepção do eco, pois a emissão acontece no transdutor central e a recepção dá-se nos quatro braços-receptores.

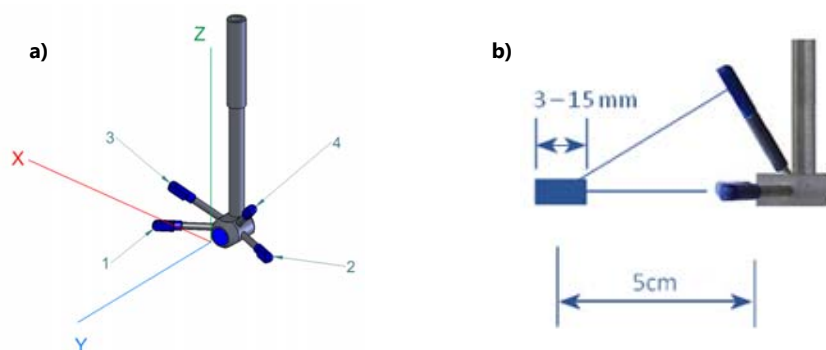


Figura 3.6 – a) Eixos positivos *Vectrino*; e b) Volume de medição com as respectivas dimensões e distâncias.

Como não é possível fazer reflectir a onda emitida na água em si, esta vai ser reflectida nas partículas que se encontram suspensas na água, que se assume terem a mesma velocidade do que a água onde se movem. Para aumentar a qualidade da medição e dos dados recolhidos, aumentou-se a concentração de partículas suspensas na água na zona do volume de medição. Para que tal aconteça, recorreu-se a *seeding* que, neste caso, se trata de pó de sílica misturado com água, que é depois drenado no sentido do escoamento de modo a incidir no ponto que se está a medir. A Figura 3.7 demonstra o procedimento de aplicação do *seeding*, misturado com água, no escoamento, bem como o *Vectrino* posicionado dentro de água em processo de medição. Para que as medições efectuadas através do *Vectrino*, resultassem em dados mais consistentes e com a maior qualidade possível, o fluxo de *seeding* era direccionado para coincidir com o volume de medição do *Vectrino* (Figura 3.6 (b)), que corresponde à zona onde os dados estão a ser recolhidos.

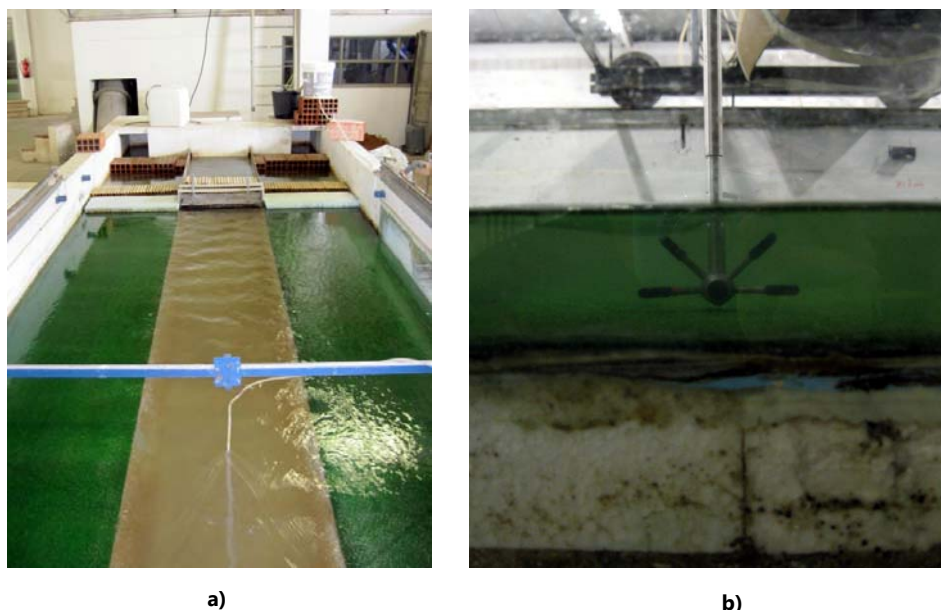


Figura 3.7 – Procedimentos de medição com o Vectrino: a) Aplicação de seeding; e b) Vectrino em processo de medição.

A fim de se arquivarem todos os dados medidos, o *Vectrino* encontrava-se ligado a um computador. Durante o processo de medição os muitos dados que eram recolhidos pelo velocímetro, iam sendo guardados no disco rígido do computador. Importa também referir a utilização de um *software* (*Vectrino Plus*), fornecido pelo fabricante, *Nortek*, que viabiliza a ligação e interacção entre o velocímetro e o computador, possibilitando a configuração das medições a efectuar segundo os parâmetros que se pretendem e o arquivamento dos dados que são obtidos nas medições. A Figura 3.8 mostra as configurações de *software* utilizadas.

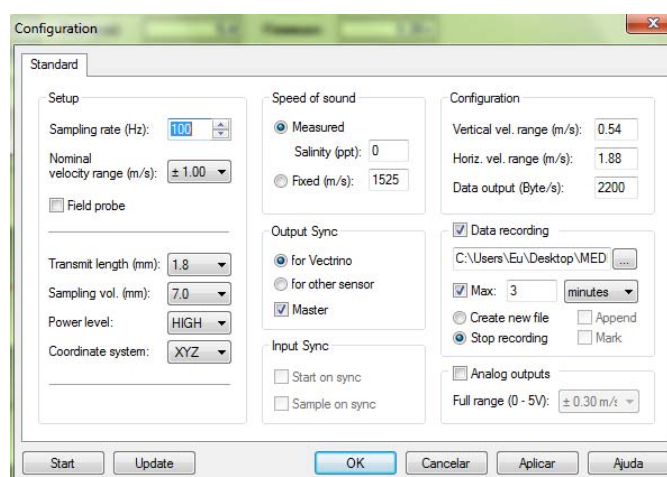


Figura 3.8 - Configuração software Vectrino.

A Figura 3.9 apresenta a visualização dos dados em tempo real no visor do computador durante uma medição, onde estão dispostos quatro gráficos, cada um correspondente a diferentes direcções de velocidade medidas, que neste caso são velocidades instantâneas. O primeiro, X, refere-se à componente da velocidade coincidente com o eixo longitudinal do canal, o segundo, Y, à componente transversal do canal e os dois últimos relacionam-se com velocidades cuja direcção é igual à direcção Z. Contudo, os últimos não se revelaram relevantes no trabalho desenvolvido para a presente dissertação.

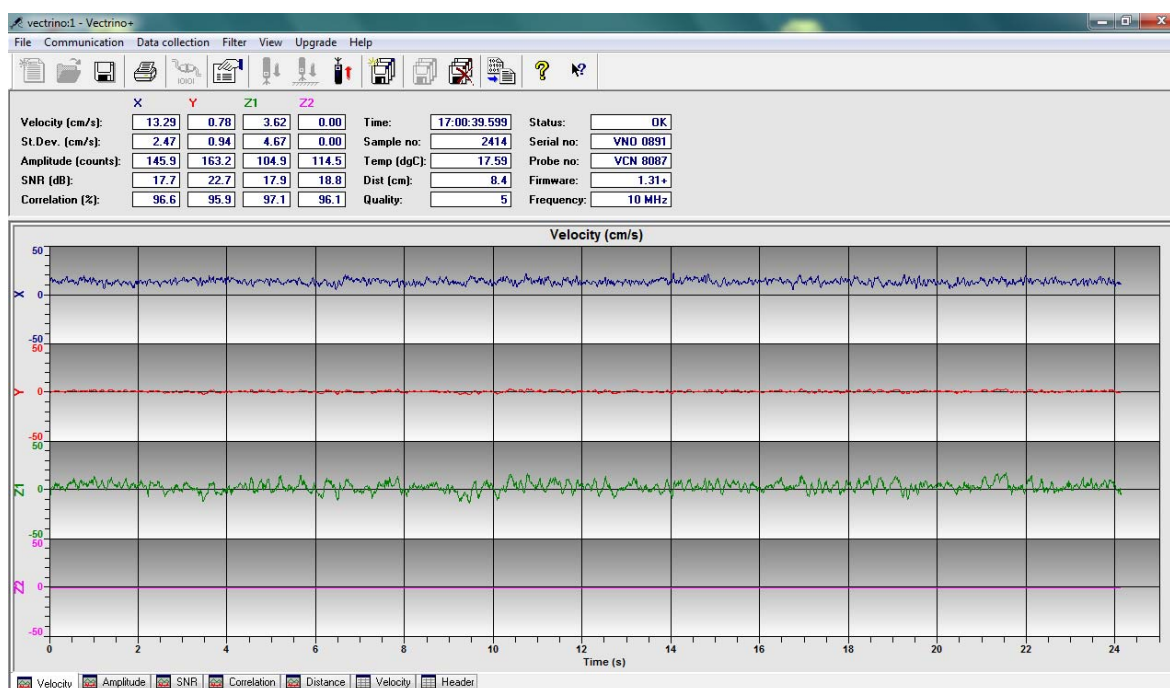


Figura 3.9 - Software do Vectrino durante medição.

3.2.2 Caudalímetros

Os caudalímetros electromagnéticos são uma ferramenta muito útil e importante, que se encontra colocada logo no início do canal, imediatamente depois das tubagens de alimentação de água provenientes do reservatório elevado. Como o próprio nome indica, têm a função de medir e indicar ao utilizador o caudal que passa nas duas tubagens que fornecem água ao canal. O caudal introduzido é regulado, com uma precisão de 0,1 (l/s), através das duas válvulas de seccionamento (Figura 3.10).

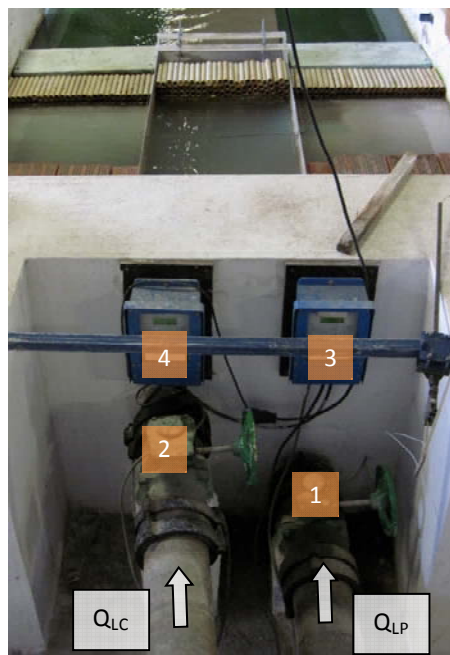


Figura 3.10 - Caudalímetros: 1) Válvula seccionamento tubagem leito principal; 2) Válvula seccionamento tubagem leito de cheia; 3) Caudalímetro leito principal; e 4) Caudalímetro leito de Cheia.

3.2.3 Teodolito e hidrómetro

Com o objectivo de serem medidas as alturas de água efectivamente verificadas no decorrer da campanha experimental, para todas as condições impostas, quer sejam diferentes alturas relativas ou regimes de escoamento, recorreu-se a um hidrómetro e a um teodolito (Figura 3.11).

Em primeiro lugar era importante colocar o teodolito numa posição de referência, que, até ser finalizada a medição das alturas de água, não podia ser modificada. O hidrómetro encontrava-se incorporado na estrutura que percorre todo o canal em carris, de modo a ser colocado em diferentes posições de X e de Y em todo o canal. À medida que se muda o hidrómetro em termos de posicionamento no eixo do X e Y até ao ponto que se deseja determinar a altura de água, é necessário também regular o mesmo no eixo do Z em duas posições, primeiro até a agulha do hidrómetro ter o primeiro contacto com a superfície livre da água e a segunda é conseguida quando a agulha toca no fundo do canal. A leitura dos dois valores dados pela régua inserida no hidrómetro é feita através do teodolito, permitindo saber a altura de água nesse ponto, efectuando a diferença entre o valor obtido na superfície livre e o valor obtido no fundo do canal. Em termos práticos foram efectuadas medições em nove secções transversais ao longo da extensão do canal, nomeadamente para $X1100$ (mm), $X3000$ (mm), $X5000$ (mm) e $X7500$ (mm), sendo que, para cada uma dessas secções foram realizadas onze

medições transversais (i.e. no eixo Y do canal), quatro para cada um dos leitos de cheia e três no leito principal. No fim, foram realizadas as médias das várias alturas de água medidas para cada uma das secções transversais.



Figura 3.11 - Medição das alturas de água: 1) Teodolito; e 2) Hidrómetro.

3.3 Procedimento experimental

Estando esta dissertação assente numa lógica de investigação, seguiu um procedimento experimental o mais normalizado possível, para que todos os dados recolhidos fossem regidos pelas mesmas regras e parâmetros, possibilitando assim uma comparação e análise, dos valores obtidos, correcta e coerente. Assim sendo, é importante definir desde já o procedimento seguido e aplicado no canal que serviu de ferramenta para o desenvolvimento do trabalho desta dissertação.

Antes do início da campanha experimental, definiu-se as condições que iriam ser impostas ao canal, em termos da rugosidade do fundo. De acordo com o tema da dissertação, é fundamental comparar resultados entre um modelo padrão e as variáveis que se pretendem estudar. Sendo assim, o modelo padrão, é o que se designa por fundo liso, que não apresenta modificações aos fundos em qualquer dos leitos, face às características originais do fundo do canal em cimento alisado (Figura 3.12). Introduziu-se depois, somente nos dois leitos de cheia, panos de relva artificial com cerca de 1,5 (cm) de espessura total e com alta densidade de pequenos elementos verticais (fibras artificiais) que simulam relva, em toda a extensão do canal, para ser possível simular a rugosidade pretendida neste leito (fundo rugoso) (Figura 5.13).



Figura 3.12 - Canal com fundo liso.

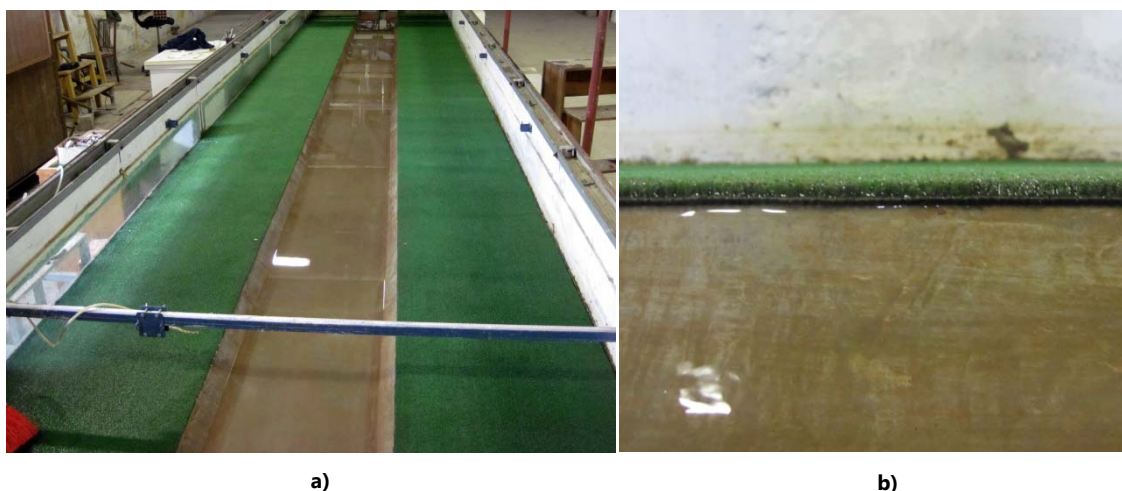


Figura 3.13 – a) Canal com fundo rugoso nos leitos de cheia; e b) Pormenor do pano de relva sintética sobre o leito de cheia (perspectiva lateral a partir do leito principal).

Em primeiro lugar, definiram-se as secções transversais que iriam ser alvo de análise, pois o canal apresenta 10 metros de comprimento, sendo dessa forma impossível, em tempo útil, analisar cada centímetro do mesmo. Nesse sentido, foram analisadas 4 secções transversais ao longo do comprimento do modelo. Seguindo de montante para jusante, a primeira secção é a que se encontra a 1100 (mm) (X1100) do início do canal. As secções subsequentes encontram-se a 3000 (mm) (X3000), a 5000 (mm) (X5000) e a 7500 (mm) (X7500) de distância do início do canal (Figura 3.14). No entanto, ao longo desta dissertação poderá ser verificado que nem todas as medições realizadas utilizaram as secções agora referidas na sua totalidade. Devido ao caminho que se pretendeu seguir no trabalho desenvolvido e ao tempo existente para o fazer, houve situações em que não se justificava existir recolha de dados em todas as secções. O esquema apresentado na Figura 3.14 situa cada secção

transversal utilizada, bem como a direcção e o sentido positivo dos eixos que servem de referência para o desenvolvimento de todos os procedimentos realizados.

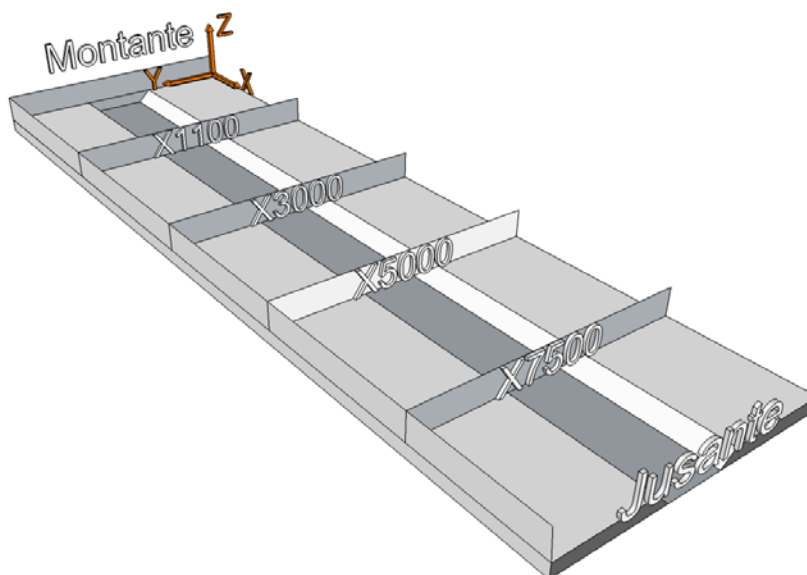


Figura 3.14 - Secções Transversais e eixos do canal.

Definidas as secções que foram alvo de medição, apresenta-se na Figura 3.15 a malha de medição adoptada para cada meia secção transversal:

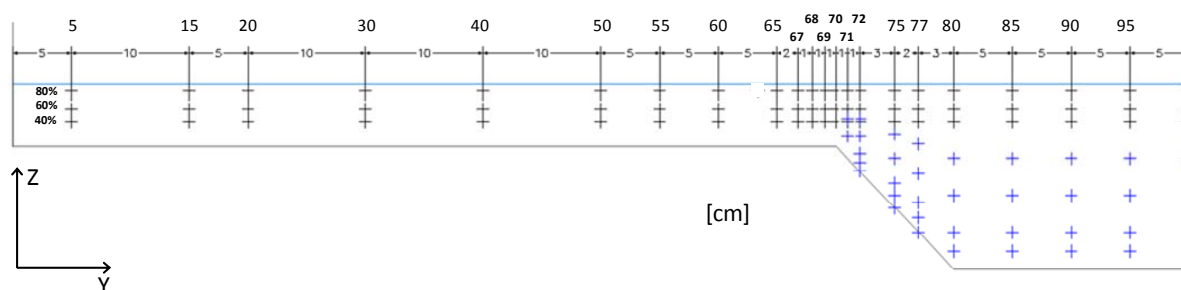


Figura 3.15 - Malha de medição - meia secção transversal.

A malha apresenta vinte e dois pontos no eixo do Y. Relativamente ao eixo do Z, foram utilizados, para o leito de cheia, três pontos verticais, que correspondem a percentagens de altura de água total de 40%, 60% e 80%. Devido à maior altura de água presente no leito principal recorreu-se a mais pontos no eixo do Z para uma melhor e mais completa caracterização do escoamento. Sendo assim, pode ser verificado na Figura 3.15 a inserção de 7 pontos de medição. Os primeiros quatro, a azul na figura, representam percentagens de 10%, 20%, 40% e 60% da altura de água, h_{Lp} , no leito

principal. Os outros três pontos que aparecem numa posição Z mais elevada, representados a preto, referem-se aos três primeiros pontos de medição, descritos para o leito de cheia, no início deste parágrafo. No total, em cada meia secção, foram medidos 102 pontos.

Assumiu-se ao longo de todos os procedimentos experimentais e apresentação de resultados, que meia secção transversal seria suficiente para representar e caracterizar o escoamento, devido à simetria existente no canal, a meio do mesmo, no plano XOZ .

Após se ter caracterizado o canal, as secções e a malha de medição, falta indicar o método prático de recolha de dados. Em primeiro lugar eram accionadas as bombas que permitiam que a água fosse elevada do reservatório subterrâneo até ao reservatório elevado, que alimenta o canal por gravidade. O caudal desejado para cada um dos leitos é regulado nas válvulas de seccionamento, presentes nas tubagens que se encontram imediatamente antes do início do canal, e monitorizado através dos caudalímetros. A estrutura que se desenvolve em carris por toda a extensão longitudinal do canal permite o posicionamento na secção transversal desejada. Esta estrutura integra o *Vectrino*, um computador para arquivamento dos dados, e várias calhas que posicionam o *Vectrino* no local de medição desejado na secção. O tempo de medição para cada ponto foi de três minutos, definido *a priori* no *software*. Passado este tempo a recolha de dados era automaticamente cessada. É ainda de realçar o facto de se terem efectuado medições com um tempo superior a três minutos de duração. Nessa medida realizaram-se diversas medições com tempo de duração de vinte minutos. Mas após uma análise dos dados, chegou-se à conclusão que três minutos era um tempo de medição suficientemente longo para uma correcta e fidedigna recolha de dados.

De forma a tornar claro e perceptível o desenvolvimento dos procedimentos experimentais são apresentados nos Quadro 3.1 e Quadro 3.2 todas as posições que foram medidas no canal, no decorrer dos ensaios, para fundo rugoso e liso, respectivamente. Na coluna respectiva aos tipos de regimes de escoamento, além de surgir o uniforme, estão inseridas várias percentagens que correspondem aos diversos regimes não uniformes de escoamento. O sinal, positivo ou negativo, das mesmas indica a sobrealimentação ou subalimentação dos leitos de cheia, respectivamente, sendo que, independentemente da percentagem de alimentação, o valor do caudal total definido para regime uniforme, é mantido.

Quadro 3.1 - Resumo ensaios realizados – Fundo rugoso.

Fundo Rugoso							
Altura relativa	Regime	Secções transversais (mm)			Perfis verticais (cm) Y=[70, 80, 100]		
		X3000	X5000	X7500	X3000	X5000	X7500
0,15	Uniforme	✓	✓	✓	✓	✓	✓
0,3	Uniforme	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Quadro 3.2- Resumo ensaios realizados – Fundo liso.

Fundo Liso									
Altura relativa	Regime	Secções transversais (mm)				Perfis verticais (cm) Y=[70, 80, 100]			
		X1100	X3000	X5000	X7500	X1100	X3000	X5000	X7500
0,15	Uniforme	-	✓	✓	✓	-	✓	✓	✓
0,2	-19%	-	-	✓	-	-	-	✓	-
	Uniforme	-	✓	✓	✓	-	✓	✓	✓
	19%	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	38%	-	-	✓	-	-	-	✓	-
	53%	-	-	✓	-	-	-	✓	-
0,3	-19%	✓	✓	✓	✓	Y70	Y70	✓	Y70
	Uniforme	✓	✓	✓	✓	Y70	✓	✓	✓
	19%	✓	✓	✓	✓	Y70	Y70	✓	Y70
	38%	✓	✓	✓	✓	Y70	Y70	✓	Y70
	53%	✓	✓	✓	✓	Y70	Y70	✓	Y70

4 Processamento dos dados

4.1 Obtenção dos valores médios

No decorrer dos trabalhos desenvolvidos para esta dissertação, um dos mais importantes terá sido o processamento de todos os dados recolhidos de forma a poderem ser interpretados e analisados. Neste capítulo irão ser explicitado os métodos utilizados para tal.

Durante o tempo de medição são recolhidas, para cada grandeza e ponto da malha de medição, cerca de 17000 amostras, que se tratam de valores instantâneos de velocidade, nas três direcções *X*, *Y* e *Z*. Para cada ponto da malha de medição medido pelo *Vectrino*, resultava num ficheiro com extensão *.vno, com toda a informação em bruto, ou seja, havia a necessidade de serem aplicados filtros para que a informação ficasse organizada e que os muitos valores instantâneos obtidos ao longo da medição, fossem apresentados como valores médios no tempo.

A organização dos ficheiros foi sendo feita por percentagens de altura de água, ou seja, primeiro eram medidos todos os pontos de, por exemplo, 40% da altura de água no leito de cheia. Sendo assim, o primeiro passo a ser efectuado consiste em converter os ficheiros com extensão *.vno em ficheiros com extensão *.adv, recorrendo ao *software* do próprio *Vectrino*, o *Vectrino Plus*. Em último lugar, procede-se à filtragem dos ficheiros *.adv através do *software* *WinADV* com o objectivo de se eliminarem picos nos valores recolhidos relativos a erros de medição, ao longo de milhares de amostras, recorrendo ao filtro desenvolvido por Goring e Nikora (2002), como se pode observar na Figura 4.1, que incorpora valores para uma medição realizada para um ponto genérico no leito principal, onde se realçam vinte segundos da mesma.

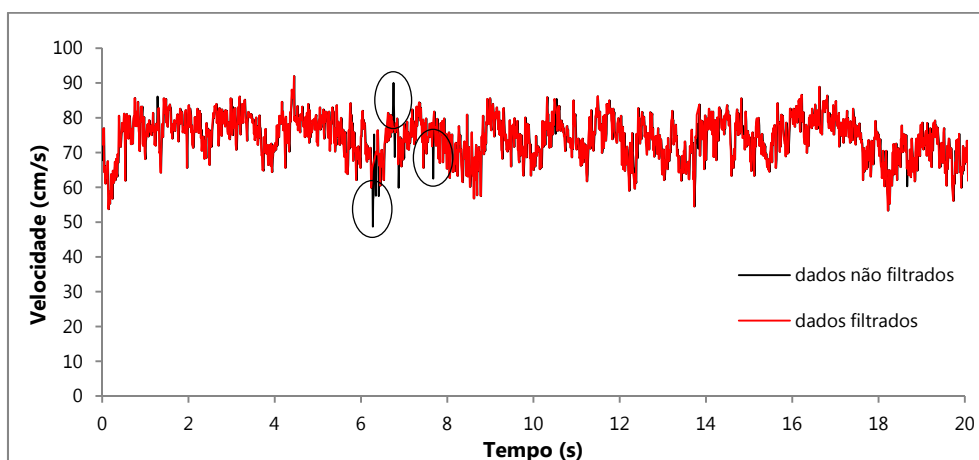


Figura 4.1 - Aplicação do filtro proposto por Goring e Nikora (2002).

Após a filtragem dos ficheiros *.adv, obtém-se um único ficheiro, lido através do *Microsoft Excel*, que reúne todos os valores de velocidade e de tensões para cada um dos pontos da malha de medição.

No fim deste procedimento, tem-se acesso aos valores medidos em médias temporais para cada posição da malha de medição (Figura 3.15), tal como a velocidade U e V , e as Tensões de Reynolds.

Tendo em conta o tipo de trabalho desenvolvido e os objectivos definidos, revela-se importante definir médias de velocidade em termos de profundidade (U_p). Partindo dos valores da velocidade média temporal (U) foi feita uma média em profundidade, da seguinte forma:

$$U_p = \frac{\int_0^h U dz}{h} \quad (4.1)$$

No leito de cheia devido ao facto de só ter sido possível medir três pontos verticais, 40%, 60% e 80% da altura de água, e ao desenho do respectivo perfil vertical de velocidade, assume-se que a média em profundidade nesta região do canal corresponde ao valor da velocidade (U) medida a 40% da altura de água. Por outro lado, o leito principal apresenta sete percentagens de altura de água medidas, não possibilitando afirmar, desde logo, que a média em profundidade vai corresponder à velocidade média em profundidade neste leito. Nesse sentido, foi efectuada a integração do perfil vertical da velocidade para cada posição Y no leito principal, de acordo com a equação (4.1). A Figura 4.2 representa, a título de exemplo, um perfil de velocidade sujeito a integração.

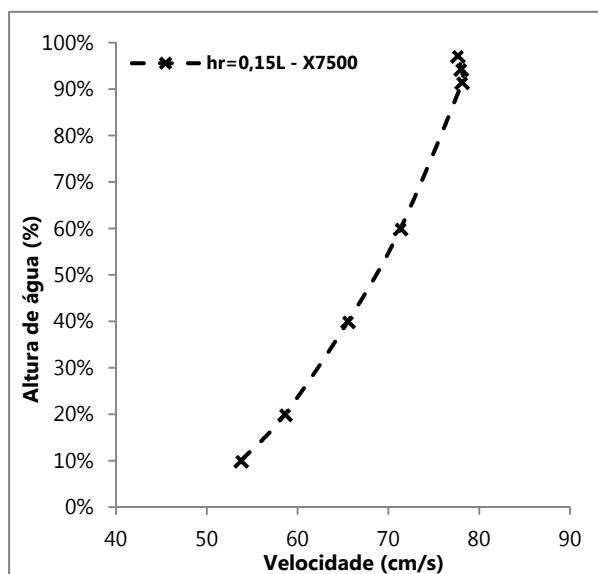


Figura 4.2 - Perfil vertical de velocidades longitudinais para $Y=90$ (cm) em regime uniforme - $h_r=0,15$ fundo liso.

Pode ser verificado na Figura 4.3 o desenvolvimento da velocidade para a secção X7500 para $h_r=0,15$ em fundo liso, tanto para a velocidade longitudinal (U) obtida a 40% da altura de água, como para a média em profundidade obtida segundo o método de integração. No leito de cheia as duas séries de dados irão coincidir totalmente pois, como foi dito, a média em profundidade para esta planície corresponde à velocidade medida a 40% da altura de água. A Figura 4.3 mostra que as duas séries de dados presentes no leito principal são praticamente coincidentes, reforçando a ideia de que a velocidade medida para 40% da altura de água representa a distribuição transversal das velocidades médias em profundidade.

A linha vertical a tracejado presente na Figura 4.3, nos 0,7 (m) no eixo da “distância lateral”, representa a fronteira entre os dois leitos e a linha preta espessa junto ao eixo das abscissas representa o traçado de meia secção transversal do canal.

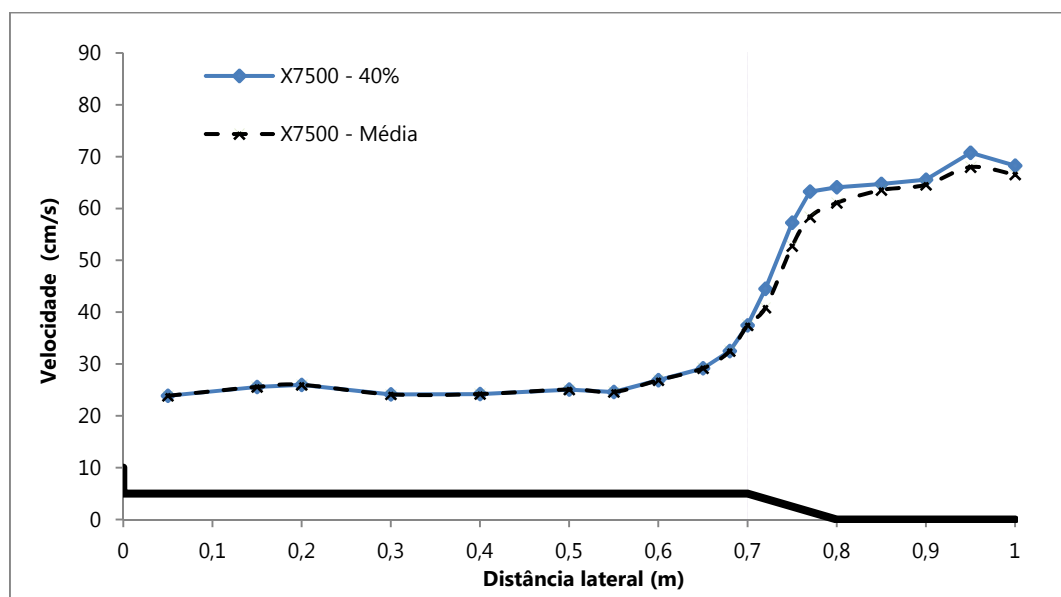


Figura 4.3 - Distribuição transversal das velocidades longitudinais a 40% da altura de água e da velocidade média segundo o método de integração em profundidade - $h_r=0,15$ em fundo liso na secção X7500.

Neste capítulo falta, por fim, referir como se determina o caudal que passa em cada uma das secções transversais. Através dos dados recolhidos ao longo de todas as medições realizadas, era possível e importante calcular o caudal que efectivamente atravessava o canal nas condições impostas, partindo do princípio que em regime uniforme, não vai existir variação das grandezas no decorrer do escoamento, de montante a jusante, ou seja, terá de haver conservação da massa. No entanto, numa instalação experimental surgem por vezes distúrbios no escoamento difíceis de serem controlados, que podem levar a que a conservação da massa não seja verificada na totalidade.

Recorrendo aos valores médios da velocidade em profundidade e utilizando o método de integração de velocidades de Pinto (2010) foram determinados os caudais nas várias secções transversais do canal.

Antes da discriminação do modo de obtenção dos caudais é importante definir a velocidade média numa dada secção transversal do canal, U_s , que se obtém integrando a média da velocidade em profundidade, U_p , em toda a largura do canal, B :

$$U_s = \frac{\int_0^B U_p dy}{B} \quad (4.2)$$

De forma a ser calculado o caudal que se escoia no canal partiu-se do princípio que se a massa do fluido que entra a montante no canal é a mesma que sai no fim do canal, então, num comprimento δs suficientemente pequeno para que a variação ΔS da área da secção recta seja desprezável, geralmente entre duas posições verticais da malha de medições, a porção de fluido contida é $(\Delta S) \times \delta s$. Se o fluido atravessa o plano BC no intervalo de tempo δt , a porção que atravessa o plano num determinado intervalo de tempo é $\delta s / \delta t$. Como $\delta s / \delta t$ é a velocidade linear U no ponto considerado, o caudal volumétrico que passa neste plano é $(\Delta S) \times U$ (Figura 4.4). O caudal total numa dada secção transversal é calculado multiplicando a velocidade média na secção, U_s , pela área da secção, S :

$$Q = U_s \times S \quad (4.3)$$

ou, pela integração, ao longo de toda a largura do canal, B , da velocidade média em profundidade, U_p , de cada posição Y da malha de medição, multiplicada pela altura do escoamento, h :

$$Q = \int_0^B U_p \times h dy \quad (4.4)$$

Na Figura 4.3 as linhas de dados iniciam-se todas no ponto 0,05 (m) no eixo do X , distância lateral. Assumiu-se para a determinação do caudal, que as linhas da figura iriam ter como primeiro ponto a origem do referencial. Procedeu-se depois à integração das linhas do gráfico, que foram multiplicadas pela altura de água medida para cada secção (4.4), obtendo-se desta forma o caudal para cada um dos leitos e consequentemente o caudal para cada secção transversal. Esses valores irão ser apresentados no capítulo 5.

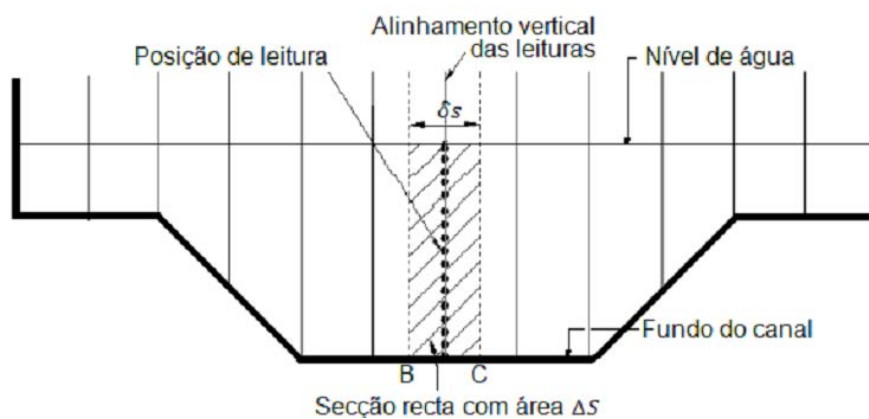


Figura 4.4 - Esquematização da integração realizada para cálculo do caudal escoado numa determinada secção (Retirada de Pinto, 2010).

5 Apresentação e discussão dos resultados

5.1 Fundo Liso

5.1.1 Regime Uniforme - $h_r=0,15$ / $h_r=0,20$ / $h_r=0,30$

A apresentação de resultados vai ser iniciada nas condições de regime uniforme de escoamento, em fundo liso, ou seja, sem relva sintética em nenhuma superfície do canal. Foram estudados três casos, que se resumem a três alturas relativas de água ($h_r=0,15$, $h_r=0,20$ e $h_r=0,30$) entre o leito de cheia e o leito principal.

A análise de dados efectuada é apresentada ao longo deste capítulo, seguindo a ordem descrita de seguida. Primeiramente será apresentada a distribuição transversal de valores da velocidade a 40% da altura de água e da velocidade média em profundidade, para a secção X7500. Depois surge um quadro que incorpora os valores dos caudais obtidos experimentalmente, figuras da velocidade média em profundidade, U_p , em várias secções transversais, dos perfis verticais de velocidade longitudinal e, por fim, as isolinhas da velocidade longitudinal, U , da velocidade transversal, V , e das tensões de Reynolds, τ_{xy} . As isolinhas foram efectuadas recorrendo ao *software MATLAB*.

Antes de se dar início à análise de resultados, apresentam-se no Quadro 5.1 os vários caudais impostos no canal, que, de acordo com o procedimento descrito em Teixeira (2011) e Massa (2011), asseguram um regime de escoamento uniforme. No Quadro 5.2 apresentam-se as alturas médias de água para todas as alturas relativas, medidas segundo o método já explicitado anteriormente, no subcapítulo 3.2.3.

Quadro 5.1 – Caudais (l/s) impostos para obtenção do regime uniforme - Fundo liso.

Altura relativa	Caudal (l/s)		
	LC	LP	Total
0,15	6,6	38,2	44,8
0,20	11,2	42,2	53,4
0,30	26,4	54,2	80,6

Quadro 5.2 – Alturas (cm) médias de água transversais em regime uniforme – Fundo liso.

Altura relativa	Secções transversais (mm)		
	X3000	X5000	X7500
0,15	1,67	1,68	1,66
0,20	2,28	2,27	2,26
0,30	4,01	4,01	4,02

Os valores de caudal valores determinados, segundo a equação (4.4) e encontram-se no Quadro 5.3. Tendo em conta que o volume de água imposto no canal pretende implementar um regime uniforme de escoamento, é desejável que a quantidade de água que entra a montante se mantenha praticamente constante ao longo de toda a extensão do canal. Neste trabalho, só foi possível determinar o caudal que efectivamente se escoou nas posições ou secções que foram objecto de medições. Para $h_r=0,15$, os resultados obtidos são satisfatórios, pois a diferença percentual (Equação (5.1)) registada entre o caudal imposto e o caudal que realmente se escoou no canal (i.e. caudal experimental) foi sempre inferior a 1%.

Quadro 5.3 – Caudais (l/s) obtidos experimentalmente em regime uniforme – $h_r=0,15$ em fundo liso.

Secções transversais (mm)	Caudal (l/s)			Diferença entre caudal experimental e imposto
	LC	LP	Total	
X3000	6,397	38,471	44,869	0,15%
X5000	6,294	38,287	44,582	-0,49%
X7500	5,743	39,466	45,209	0,91%

$$\frac{Q_{total\ obtido} - Q_{total\ imposto}}{Q_{total\ imposto}} \quad (5.1)$$

Na Figura 5.1 está representada a distribuição transversal das velocidades médias em profundidade para todas as secções transversais, que, como foi indicado no capítulo 4, corresponde, aproximadamente, à velocidade medida a 40% da altura de água total.

A primeira interpretação que pode ser feita através da análise da Figura 5.1 vai no sentido de que todas as secções estudadas apresentam um comportamento idêntico, reforçando a análise feita, no parágrafo anterior. Desta forma, é possível assumir que o regime uniforme que se pretendeu impor foi alcançado. Contudo, se for feita a comparação entre as duas primeiras secções com a secção X7500, existe uma ligeira evolução do escoamento no leito de cheia. Nesta última, verifica-se a diminuição dos valores da velocidade a partir da posição lateral $Y=0,30$ (m) até $Y=0,70$ (m), algo que não seria expectável se for tido em conta o típico desenvolvimento da camada de mistura na região onde se cruzam os dois escoamentos correspondentes a cada um dos leitos. Os valores dos caudais incorporados no Quadro 5.3 corroboram a diminuição dos valores da velocidade e evidenciam uma ligeira transferência de massa entre o leito principal e os de cheia.

As velocidades no leito principal são bem mais elevadas do que no leito de cheia. Se for efectuada uma média das velocidades, separadamente, em cada um dos leitos, por exemplo para a secção X7500, o valor médio verificado no leito principal é cerca do dobro do valor obtido na planície de inundação. Verifica-se, por fim, uma ligeira diminuição da velocidade junto ao bordo esquerdo do canal, que deriva do facto da água nessa zona se escoar em directo contacto com a parede do canal, onde se vai gerar atrito, resultando em perda de energia por parte do escoamento.

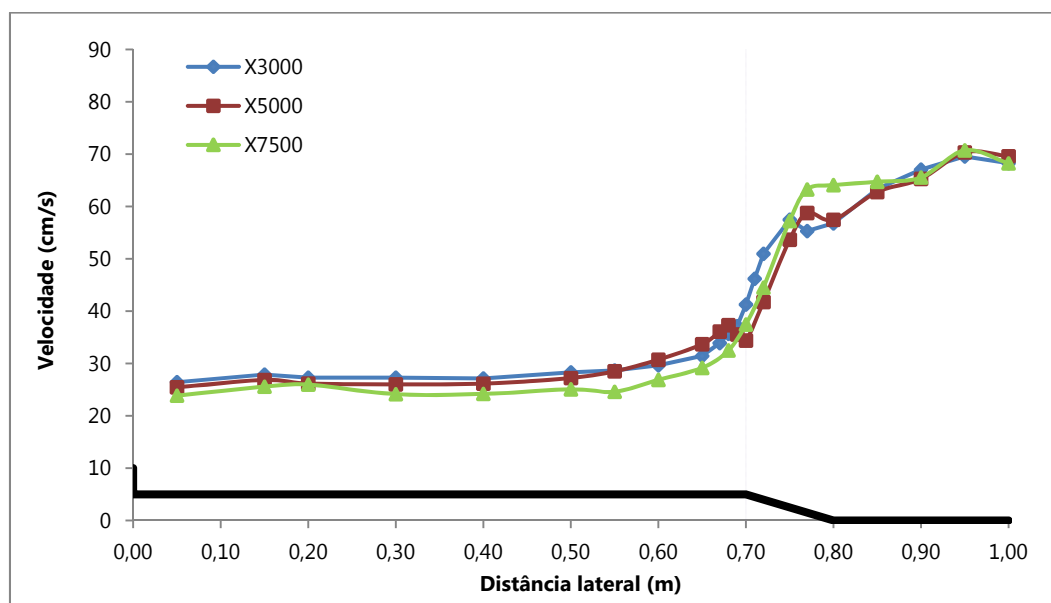


Figura 5.1 - Distribuição transversal das velocidades longitudinais médias em profundidade em regime uniforme - $h_r=0,15$ em fundo liso.

Na Figura 5.2 mostram-se 3 perfis verticais de velocidade média temporal, U , medidos para a altura relativa de $h_r=0,15$, exactamente a meio do canal ($Y=100$ cm), para todas as secções. Os perfis

obtidos resultam de medições efectuadas em treze pontos verticais, que correspondem a diferentes percentagens de altura de água, que se iniciam a 5%, mais perto do fundo, até 95% de altura de água, muito perto da superfície livre.

Determinou-se ainda uma última série de valores a partir do perfil vertical de velocidades de X7500, representada na figura por “lei logarítmica”, válida para fundo liso. Esta curva foi obtida através da relação entre a velocidade, U , e a velocidade de atrito junto ao fundo, U_* ,

$$\frac{U}{U_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{Z \times U_*}{\nu} \right) + A \quad (5.2)$$

onde $\kappa=0,41$ é a constante de Von Kármán, A é uma constante logarítmica igual a 5,3 para escoamentos com superfície livre (Nezu e Nakagawa, 1993) e U_* é a velocidade de atrito junto ao fundo, definida por,

$$U_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \quad (5.3)$$

onde τ_0 é a tensão de arrastamento (Pa) e ρ a massa volúmica da água igual a 1000 (Kg/m³).

Pode observar-se que os quatro perfis são praticamente coincidentes até 20% da altura de água apresentando assim um comportamento logarítmico, permitindo assumir que a meio do canal temos um escoamento $2D$.

Comparando os três perfis, é possível verificar que demonstram um desenvolvimento similar, principalmente até cerca de 50% de altura de água. Após este ponto, as duas secções mais a jusante apresentam valores mais elevados de velocidade. Este comportamento permite induzir e perceber o desenvolvimento da camada limite e a forma como o fundo afecta as velocidades verticalmente.

Num ponto mais a montante, a influência do fundo ainda não é totalmente sentida por parte do escoamento, ou seja, a camada limite não se encontra totalmente desenvolvida, existindo assim um perfil de velocidades com um desenho mais vertical e com valores mais constantes a partir de 50% da altura de água. Ao analisar os perfis subsequentes é identificável um padrão de comportamento onde estes se vão deformando e tornando mais inclinados e curvos no sentido do fundo, sendo possível retirarem-se conclusões acerca do desenvolvimento, crescimento e estabilização da camada limite turbulenta, reflectindo ao mesmo tempo, a influência gradualmente maior por parte do fundo no escoamento.

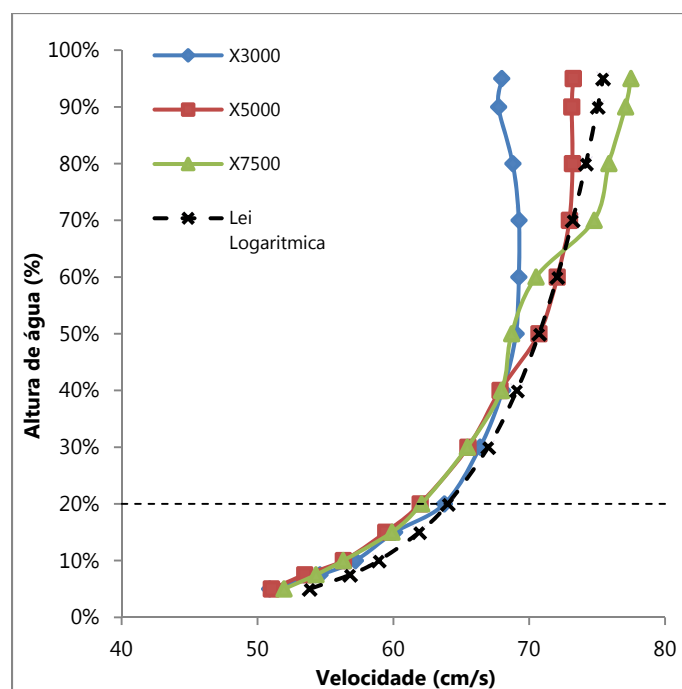


Figura 5.2 - Perfis verticais da velocidade longitudinal para $Y=100$ (cm) em regime uniforme - $h_r=0,15$ fundo liso.

Foi indicado no capítulo 4.1 como foram obtidos os valores médios temporais das velocidades a partir das velocidades instantâneas recolhidas para cada ponto da malha de medição. Torna-se importante apresentar esses resultados de uma forma que seja possível interpretá-los, analisá-los e compará-los. Para tal, recorreu-se a isolinhas de velocidade, ou seja, linhas ou curvas que apresentam o mesmo valor de velocidade em toda a sua extensão, deixando clara a distribuição das mesmas, tanto no leito principal como no leito de cheia.

Os valores de velocidade representados pelas isolinhas presentes na Figura 5.3 são valores adimensionalizados. Cada uma das secções transversais apresentadas tem um valor de velocidade média (Equação (4.3)) e vários valores recolhidos de velocidade média temporal correspondentes a cada ponto da malha de medição. Estes últimos foram divididos pela respectiva velocidade média da secção a que correspondem, resultando em valores adimensionais, U/U_s .

O eixo das abcissas das figuras das isolinhas segue o exemplo descrito no parágrafo anterior. Como foi já referido, este eixo representa a distância até ao bordo esquerdo do canal, que se denominou de distância Y ao longo dos procedimentos experimentais. Pode-se observar nos referenciais abaixo, que esta distância é representada por Y/b_f , que não é mais do que a distância Y , de meia secção (0 a 1 m) a dividir pela largura de um leito de cheia (0,7 m). Sendo assim, a interface leito

de cheia, leito principal, encontra-se na posição $Y/B_f=0,7/0,7=1,0$, e o meio do canal em termos transversais, encontra-se na posição $Y/B_f = 1,0 / 0,7 \sim 1,429$.

De modo a interpretar, correctamente, os gráficos a seguir apresentados, falta referir o significado das cores neles presentes. Os valores encontram-se entre 0 e 1,8, correspondendo os valores mais baixos a tons de azul e os mais elevados a cores mais quentes, como o cor-de-laranja e o vermelho.

Analisando somente o desenvolvimento do escoamento longitudinal nas secções *X3000*, *X5000* e *X7500* para $h_r=0,15$ na Figura 5.3, verifica-se que o leito de cheia apresenta velocidades substancialmente menos elevadas do que no leito principal, evidenciando ainda, o desenvolvimento da camada de mistura com velocidades maiores a estenderem-se para o seu interior perto da interface.

Em termos médios, os valores de velocidade nas planícies de inundação são cerca de metade daqueles observados no leito principal. Além disso, à medida que o escoamento de água se vai desenvolvendo longitudinalmente a velocidade no centro do leito principal vai aumentando ligeiramente. Ainda assim, na região de interface onde os dois escoamentos coabitam, destaca-se uma evolução nos valores de velocidade que se encontram do lado do leito principal. A velocidade nesta zona revela-se, de montante para jusante, ligeiramente mais baixa, que é consequência do desenvolvimento da camada de mistura.

Constata-se nesta análise de velocidades valores similares à medida que se avalia o canal longitudinalmente, o que evidencia, tal como aconteceu nos resultados médios da velocidade em profundidade, o regime uniforme que se pretende impor.

A curvatura das isolinhas de velocidade apresentadas permite também aferir sobre a presença de correntes secundárias. Podem ser constatadas ligeiras inflexões, pontuais, nas isolinhas, que seguem um padrão facilmente identificável, que reflectem o efeito de correntes secundárias sobre as partículas em suspensão na água, fazendo com que estas se desloquem transversalmente à direcção do escoamento. Estes fenómenos são principalmente verificados no leito principal da secção *X7500*, estendendo-se também para o leito de cheia. Estas inflexões sugerem dois vórtices de eixo horizontal, com direcção coincidente com o eixo do *X* do canal (Figura 5.3 (c)), com sentidos contrários, e ainda a presença de vórtices de eixo vertical na interface dos dois leitos, que sustentam as transferências de quantidade de movimento nessa região.

Os fenômenos turbulentos identificados, através das isolinhas, sustentam a transferência de massa entre os dois leitos, nos dois sentidos, e a presença de vórtices de eixo horizontal no leito principal, como foi sugerido por Shiono e Knight (1991) (Figura 2.4).

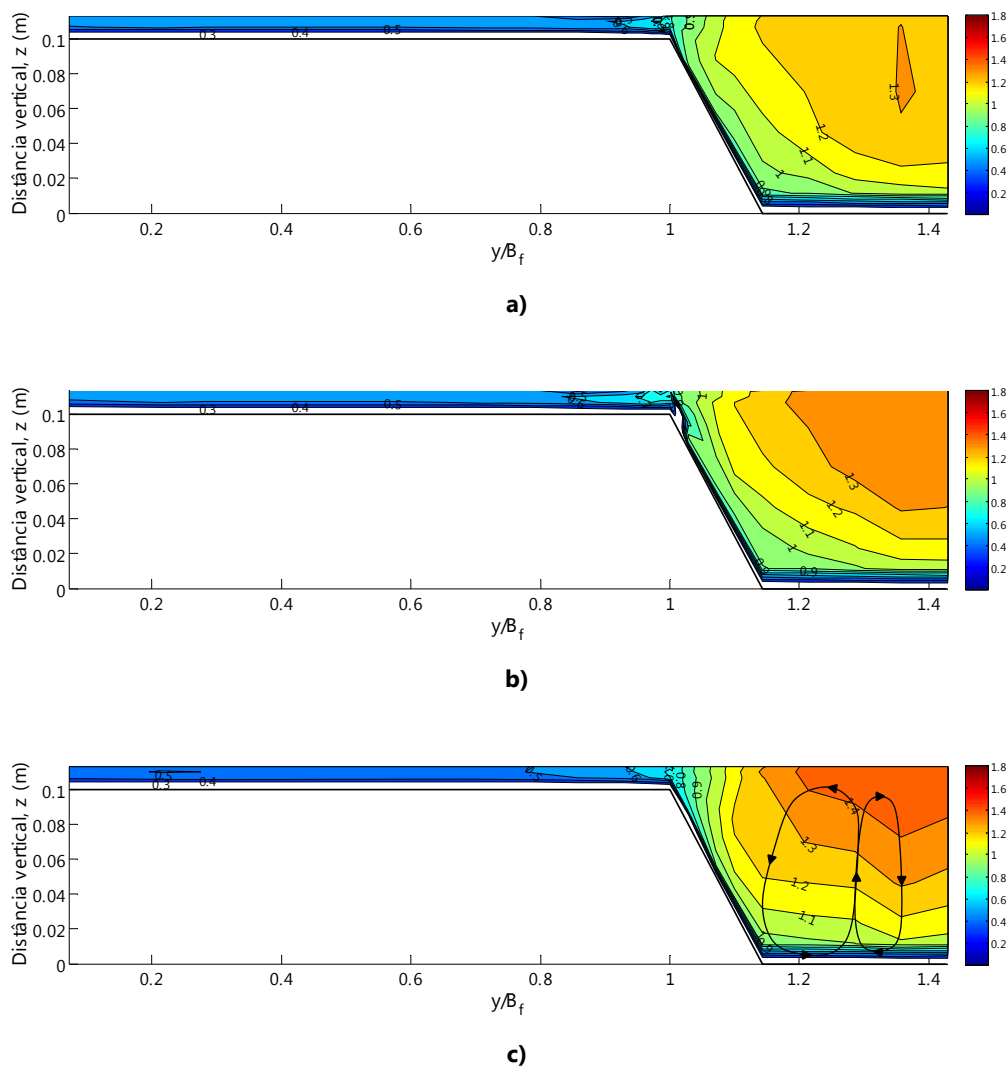


Figura 5.3 - Isolinhas da velocidade U/U_s em regime uniforme - $h_r=0,15$ em fundo liso para: a) Seção X3000; b) Seção X5000; e c) Seção X7500 com esquema dos vórtices de eixo horizontal.

Após terem sido analisados os dados relativos à velocidade longitudinal, U , vão ser apresentados os valores da componente transversal da velocidade, V , com a introdução de setas, de forma a tornar mais clara os fenômenos de transferência de massa. Torna-se importante interpretar estes dados, pois através deles poderá ser possível verificar a existência de correntes e fenômenos turbulentos secundários e eventuais transferências de massa entre leitos, que se pretendem identificar e estudar nesta dissertação. No entanto, as medições de velocidade realizadas nesta direcção (transversal), não obstante todo o cuidado e sentido crítico tido nos procedimentos experimentais e na

análise dos dados obtidos, são algo sensíveis, e o aparelho de medição tem de estar totalmente alinhado no canal para uma correcta medição. Portanto, os dados recolhidos só são considerados após uma análise cuidada dos mesmos.

Na Figura 5.4 apresentam-se as isolinhas das médias temporais de V nas três secções estudadas para a altura relativa $h_r=0,15$. Assim, de acordo com a direcção e sentido, definidos no Capítulo 3, para o eixo Y do canal, nos gráficos das isolinhas, as velocidades positivas têm sentido da esquerda para a direita (i.e. do leito de cheia para o leito principal) e as negativas da direita para a esquerda (i.e. do leito principal para o leito de cheia).

A interface entre os dois leitos é uma das zonas mais importantes e interessantes para ser analisada, como é demonstrado por estas isolinhas. De uma maneira mais ou menos clara, é possível verificar a transferência de massa e de quantidade de movimento entre os dois leitos na zona onde estes se juntam, em todas as secções. Observando da esquerda para a direita, a zona onde o leito de cheia acaba e o leito principal se inicia, tem velocidades negativas mais perto da superfície livre, passando para valores ligeiramente positivos mais perto do fundo do leito de cheia, verificando-se a existência de vórtices com um eixo de rotação coincidente com o eixo X do canal e vórtices com eixo vertical, na zona de interface.

Olhando somente para o leito principal, e principalmente para a secção estudada mais a jusante, percepção-se na zona mais central do mesmo uma diminuição dos valores das velocidades, em contraste com o que se passa à volta desta zona central, em que se verificam velocidades com valores bem mais elevados, contudo, nas secções $X5000$ e $X7500$, estes valores não indiciam a presença de um vórtice com um eixo de rotação horizontal, pois estes diminuem de intensidade mas mantêm-me na gama de valores positivos. Ainda assim, é possível pôr em hipótese a existência de uma corrente secundária de maiores dimensões, transversal a toda a secção, facto que só poderia ser confirmado com dados para toda a secção.

No entanto, nas isolinhas da secção $X3000$, este fenómeno, no leito principal, torna-se um pouco mais evidente. Se for analisada a área definida pelas coordenadas $Y/b_f = [1 ; 1,2]$ e a distância vertical $Z = [0,06 ; 0,1]$ (m), identificam-se velocidades V negativas, o que suporta a teoria da existência de um vórtice de eixo horizontal, situado no leito principal.

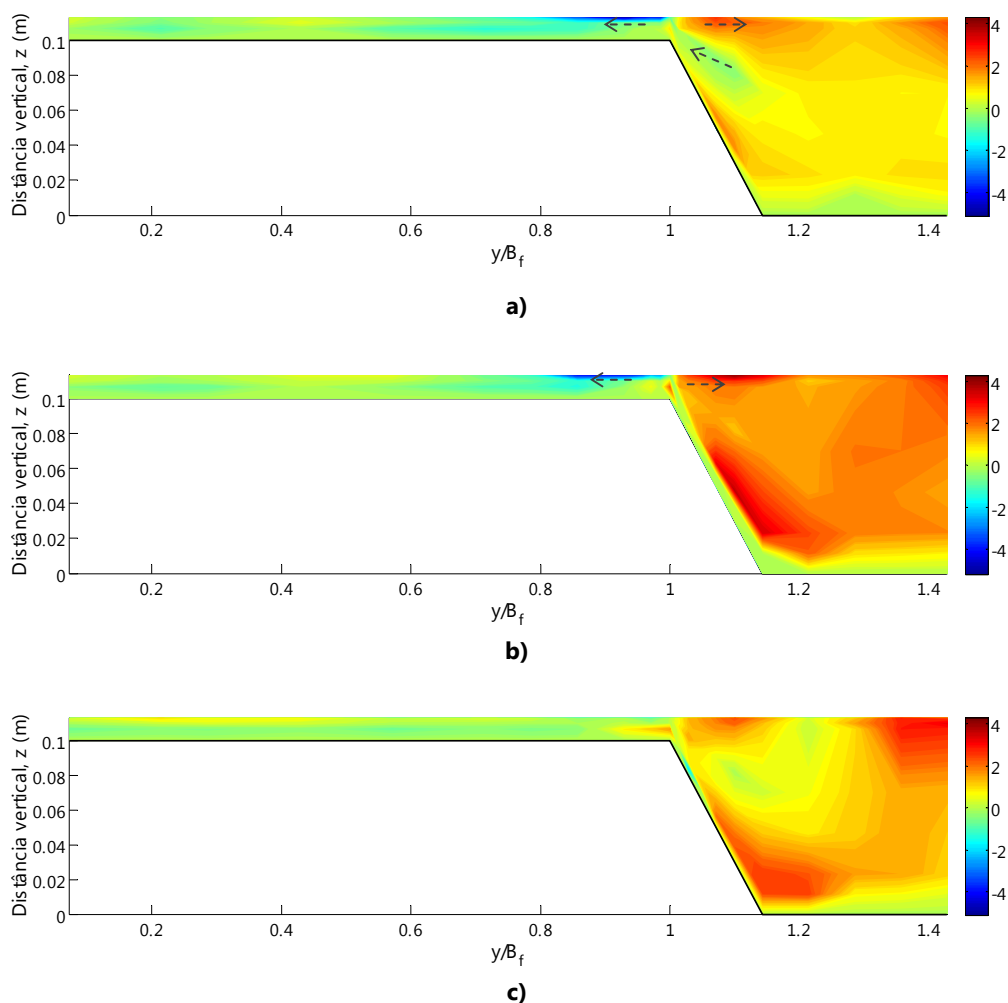


Figura 5.4 - Isolinhas das velocidades transversais (cm/s) em regime uniforme - $h_r=0,15$ em fundo liso para: a) Secção X3000; b) Secção X5000; c) Secção X7500.

As tensões de Reynolds, τ_{xy} , são obtidas através da seguinte equação:

$$\tau_{xy} = -\rho \times (\overline{U' \times V'}) \quad (5.4)$$

em que U' e V' são as componentes de flutuação turbulenta da velocidade.

É possível verificar nas isolinhas de τ_{xy} , presentes na Figura 5.5, que, em quase toda a secção transversal os valores dessas tensões são quase nulos, sendo praticamente desprezáveis face aos valores observados na interface entre o leito de cheia leito principal. O facto de as tensões estarem maioritariamente presentes na interface, não é alheio ao que seria expectável, pois vai de encontro à interacção entre os dois escoamentos, de diferentes características, nos dois leitos, que se pretende estudar.

No início do canal, no ponto mais a montante, temos o ponto de partida para dois escoamentos com diferentes velocidades, que vão entrar em contacto e interagir ao longo de todo o canal. Os valores das tensões obtidos tornam esta interacção na interface entre os dois leitos tangível, evidenciando a turbulência que se gera nesta zona.

Outro fenómeno associado à coexistência dos dois escoamentos é o desenvolvimento da camada de mistura ao longo do canal, que, mais uma vez, é corroborado pelas isolinhas das Tensões de Reynolds. De montante para jusante, ao longo das várias secções transversais, na fronteira entre o leito de cheia e o leito principal, constata-se que as tensões aumentam em valor, intensidade, e em área, tanto lateralmente para os dois leitos, como também em profundidade, sendo assim evidenciado o desenvolvimento da camada de mistura.

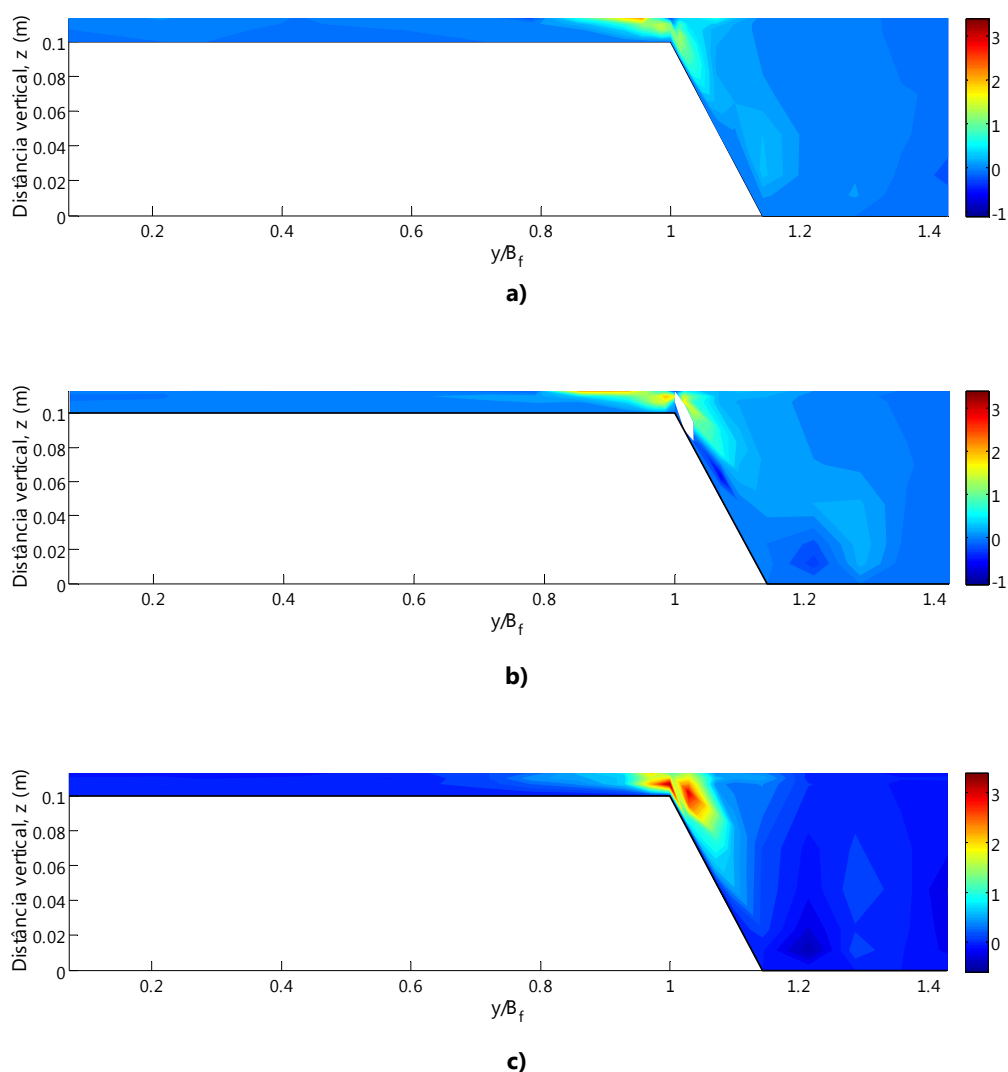


Figura 5.5 - Isolinhas das tensões de Reynolds τ_{xy} (Pa) em regime uniforme – $h_r=0,15$ em fundo liso para: a) Secção X3000; b) Secção X5000; e c) Secção X7500.

Seguindo a mesma análise efectuada para a altura relativa $h_r=0,15$, apresentam-se de seguida os resultados para a altura relativa $h_r=0,20$, em fundo liso, regime uniforme. De modo a estabelecer-se o regime uniforme no canal, foram impostos os caudais de 11,2 (l/s) e 42,2 (l/s), no leito de cheia e principal, respectivamente.

A Figura 5.6 apresenta as velocidades longitudinais medidas a uma altura de água de 40% e a média em profundidade segundo a Equação (4.1) de todas as velocidades medidas para a mesma posição Y do canal, seguindo o método já explicado, para a altura relativa de $h_r=0,15$. Observando a figura, percepção-se um desenvolvimento muito similar entre as velocidades medidas a uma altura de água de 40% e a média em profundidade, havendo assim a possibilidade de se considerarem as velocidades medidas a 40% da altura total de água, como a velocidade média em profundidade para cada posição na malha de medição, ao longo de toda a secção transversal, para $h_r=0,20$.

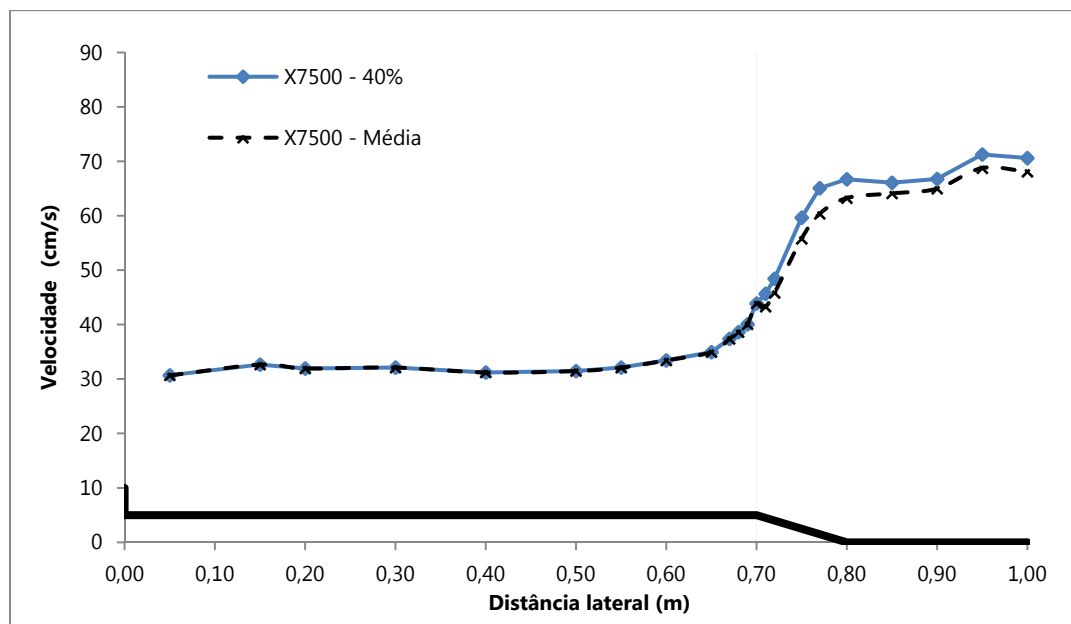


Figura 5.6 - Distribuição transversal das velocidades longitudinais a 40% da altura de água e da velocidade média segundo o método de integração em profundidade - $h_r=0,20$ em fundo liso na secção X7500.

Mantendo a análise nas velocidades médias em profundidade, poderá observar-se na Figura 5.7 três distribuições transversais das mesmas. Verifica-se para esta altura relativa o mesmo que foi observado para $h_r=0,15$, ou seja, de um modo geral, os perfis apresentam um comportamento semelhante em todas as secções, reforçando a ideia que o regime uniforme imposto no início do canal é reflectido nos dados da velocidade recolhidos, e a série de dados X7500 revela valores ligeiramente menos elevados no leito de cheia e mais elevados em certas zonas do leito principal, face às duas

secções anteriores, indiciando um comportamento que não vai de encontro ao que seria expectável num desenvolvimento da camada de mistura neste tipo de canal.

A maior altura de água no canal principal impõe velocidades substancialmente superiores, resultado de uma menor influência do fundo no escoamento, nomeadamente, em posições perto do centro do leito principal. No leito de cheia verifica-se uma diminuição das velocidades no extremo lateral do canal, devido ao atrito gerado pela parede do canal.

Foram calculados os caudais nas várias secções transversais (Quadro 5.4), seguindo o método de cálculo preconizado anteriormente (Equação (4.4)). A diferença entre o caudal imposto e o calculado ronda 1%, valor praticamente insignificante, sustentando, assim, o regime uniforme a que o canal foi sujeito.

Quadro 5.4 – Caudais (l/s) obtidos experimentalmente em regime uniforme – $h_r=0,20$ em fundo liso.

Secções transversais (mm)	Caudal (l/s)			Diferença entre caudal experimental e imposto
	LC	LP	Total	
X3000	10,446	42,377	52,823	-1,08%
X5000	10,584	43,237	53,822	0,79%
X7500	9,909	42,816	52,718	-1,28%

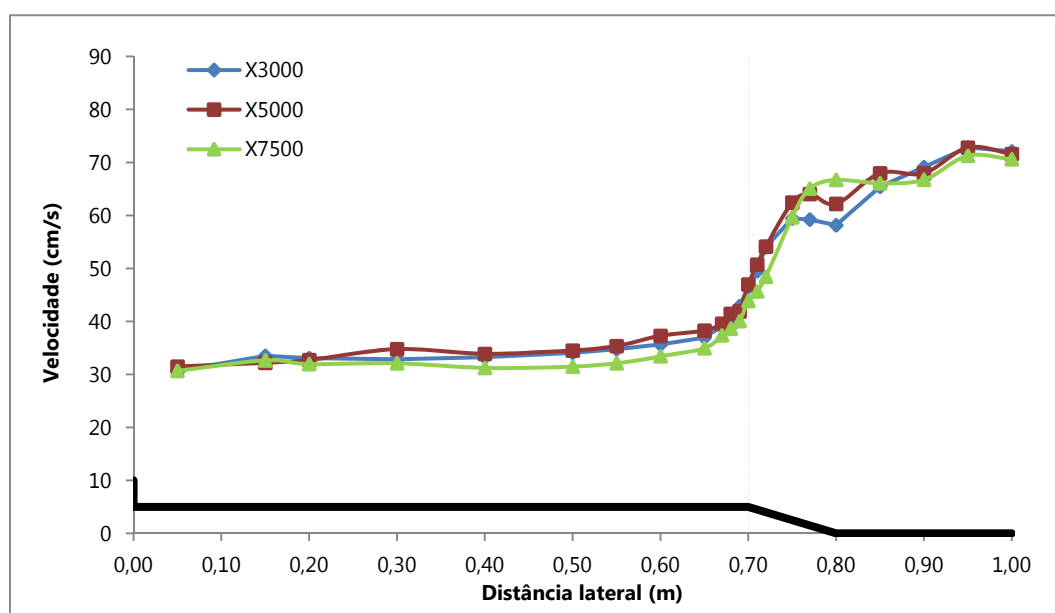


Figura 5.7 - Distribuição transversal das velocidades médias em profundidade em regime uniforme - $h_r=0,20$ em fundo liso.

De seguida apresentam-se três perfis verticais de velocidade longitudinal a meio do canal ($Y=100$ cm), para 13 pontos verticais a diferentes percentagens de altura de água.

Como é expectável, à medida que as velocidades são medidas em posições mais afastadas do fundo do canal obtêm-se valores de velocidade mais elevados, devido à menor influência do fundo no desenvolvimento de escoamento. Por outro lado, observa-se até metade da altura de água total um padrão muito similar entre as três secções medidas, contudo, observando o comportamento dos perfis de montante para jusante nota-se que estes tendem, cada vez mais, para valores mais elevados de velocidade, nessa medida, temos dados que corroboram o crescimento da camada limite turbulenta, como foi verificado previamente para $h_r=0,15$.

Falta referir a série de dados presente na Figura 5.8 denominada "lei logarítmica", que foi inserida juntamente com os perfis de velocidade de modo a ser identificado um padrão logarítmico no comportamento dos mesmos. Esta análise incide principalmente sobre o perfil mais a jusante, pois será aquele que ao longo do canal se encontrará mais em equilíbrio e menos instável. Até 20% da altura de água verifica-se, principalmente, no perfil $X7500$, um desenvolvimento praticamente igual ao da lei logarítmica, sendo assim, está assegurado que este perfil segue uma lei logarítmica, tornando consistente a ideia de um escoamento 2D.

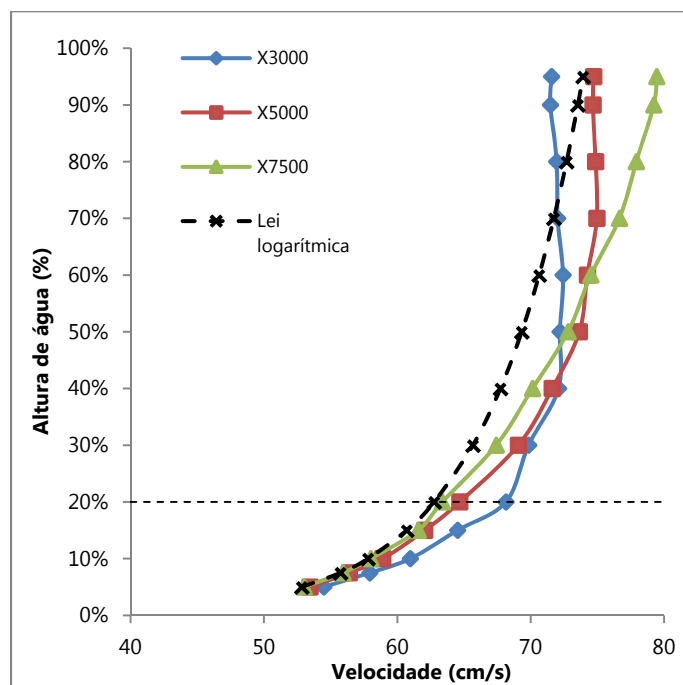


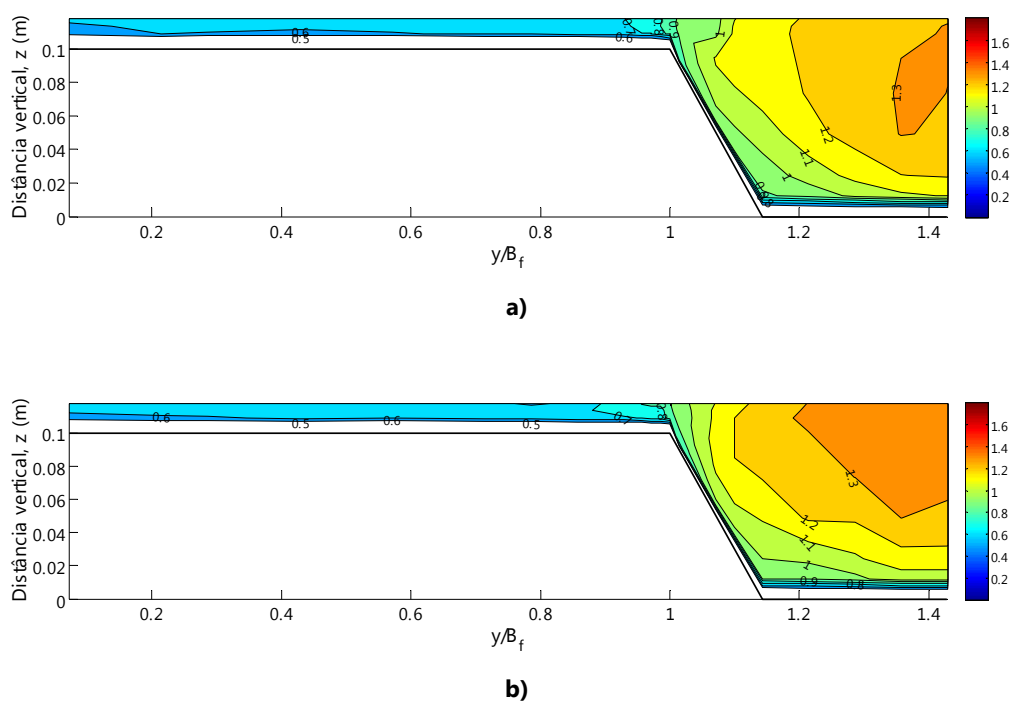
Figura 5.8 - Perfis verticais de velocidade longitudinal para $Y=100$ (cm) em regime uniforme - $h_r=0,20$ fundo liso.

A Figura 5.9 representa as isolinhas para $h_r=0,20$ em termos de velocidades médias temporais, com direcção longitudinal.

No leito de cheia a água é escoada de uma forma mais lenta face ao leito principal que apresenta velocidades bem mais elevadas, aumentando ligeiramente nas secções transversais de montante para jusante. No centro do leito principal são observadas as velocidades mais elevadas.

A zona de interface dos dois leitos possibilita verificar o equilíbrio que se vai instalando à medida que o escoamento vai de montante para jusante. Nas isolinhas da secção transversal X3000, na zona de interface, observa-se uma destabilização maior das curvas de nível das velocidades, que se vai desvanecendo para as secções subsequentes, apontando para uma tendência de equilíbrio entre os dois leitos ao longo da extensão longitudinal do modelo, de montante para jusante, corroborando também o regime uniforme imposto. Analisando ainda a zona de interface e tal como sucedeu para $h_r=0,15$, é possível identificar o crescimento da camada de mistura ao longo do desenvolvimento do escoamento através das várias secções transversais.

É possível identificar-se o desenvolvimento de correntes secundárias derivado das inflexões presentes nas isolinhas, como pode ser visto na Figura 5.9 (c), bem como a propagação das velocidades do leito principal, mais elevadas, para o leito de cheia, onde temos velocidades substancialmente mais baixas, revelando transferência de quantidade de movimento entre os dois leitos e a presença de vórtices de eixo vertical na interface.



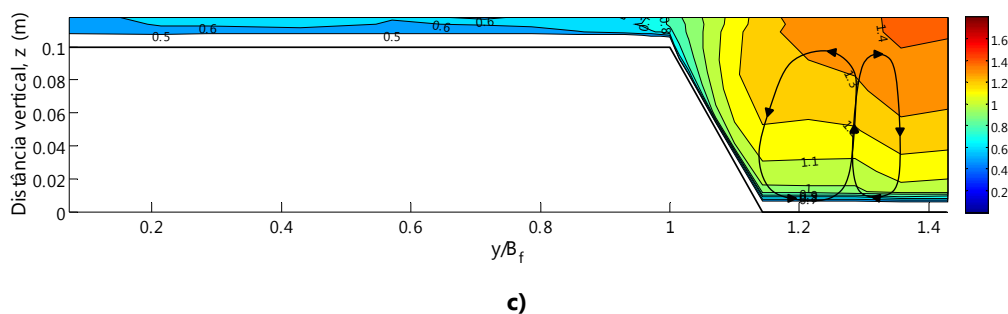
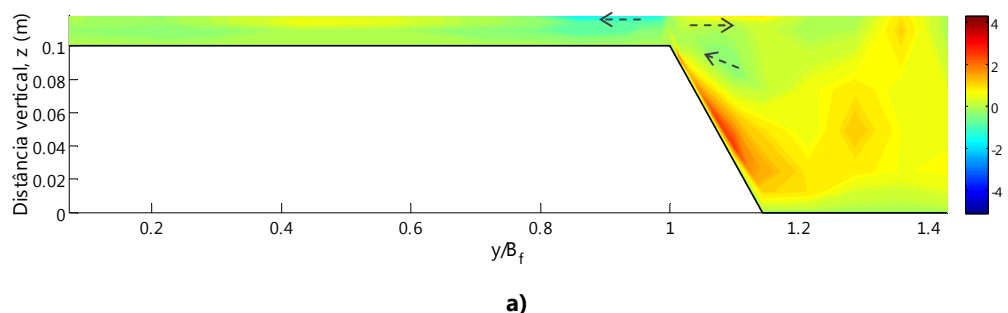


Figura 5.9 - Isolinhas da velocidade U/U_s em regime uniforme - $h_r=0,20$ em fundo liso para: a) Secção X3000; b) Secção X5000; c) Secção X7500 com esquema dos vórtices de eixo horizontal.

As isolinhas da Figura 5.10 apresentam as velocidades transversais para $h_r=0,20$, onde os valores das velocidades transversais estão balizados entre -2 (cm/s) e 3 (cm/s), sendo que, as cores avermelhadas representam velocidades mais elevadas, enquanto as de tom azul velocidades de valor mais baixo.

Observando a Figura 5.10, constata-se que as isolinhas demonstram um comportamento semelhante, principalmente nas secções X5000 e X7500. Uma interpretação do leito de cheia leva a concluir uma semelhança mais vincada nas duas primeiras figuras, mas em todas elas se identifica, um possível vórtice de eixo horizontal, mais ou menos a meio do leito de cheia, derivado da presença de velocidades transversais positivas quase na superfície livre e, a área circundante, revelar velocidades negativas, confirmando o que se verificou para a Figura 5.9.

Como já se tinha observado para $h_r=0,15$, é visível a existência de vórtices de eixo vertical e transferências de massa na interface dos dois leitos, tanto da esquerda para a direita, como no sentido contrário. Será também possível concluir acerca de estruturas secundárias no leito principal. Os valores e o sinal das velocidades transversais nesta zona podem indiciar a existência de correntes secundárias de eixo horizontal, pois existem velocidades de valor positivo na cota $Z=0,04$ (m), passando depois a verificar-se por volta da cota $Z=0,08$ (m), velocidades negativas, correspondente à área a azul.



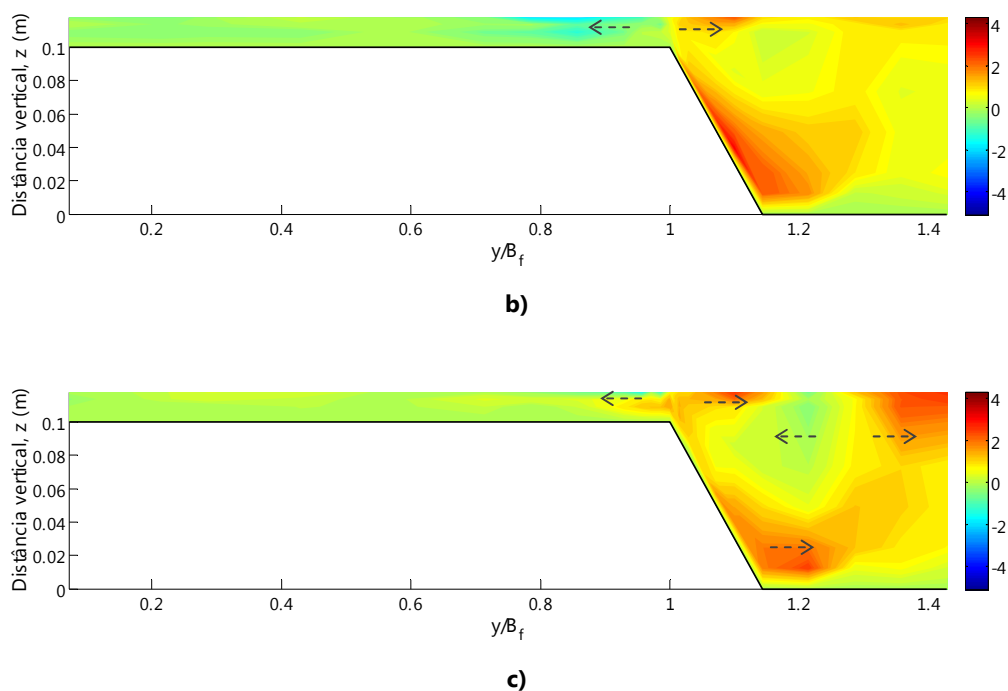
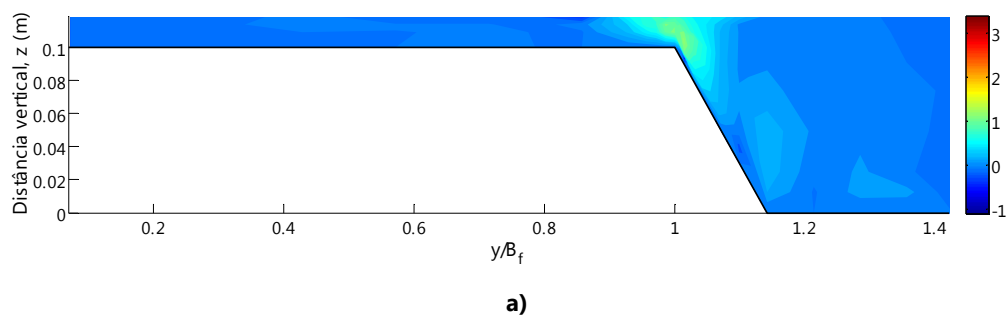


Figura 5.10 - Isolinhas das velocidades transversais (cm/s) em regime uniforme - $h_r=0,20$ em fundo liso para: a) Secção X3000; b) Secção X5000; c) Secção X7500.

As tensões de Reynolds, mostradas na Figura 5.11, permitem verificar a presença de tensões mais elevadas na interface dos dois leitos. Nesta zona vai ocorrer maior parte da turbulência, devido maioritariamente à diferença de velocidades que existe entre os dois leitos.

Analisando o comportamento do escoamento, através das três secções, de montante para jusante, observa-se o crescimento da camada de mistura, tanto lateralmente, como em profundidade, sustentado pelo aumento das tensões, tanto em valor como em área, na fronteira das duas planícies. No entanto, os valores de τ_{xy} para $h_r=0,20$, são menores do que aqueles verificados num escoamento $h_r=0,15$, apontando para uma interacção turbulenta menor, à medida que a razão entre a altura de água em cada leito aumenta.



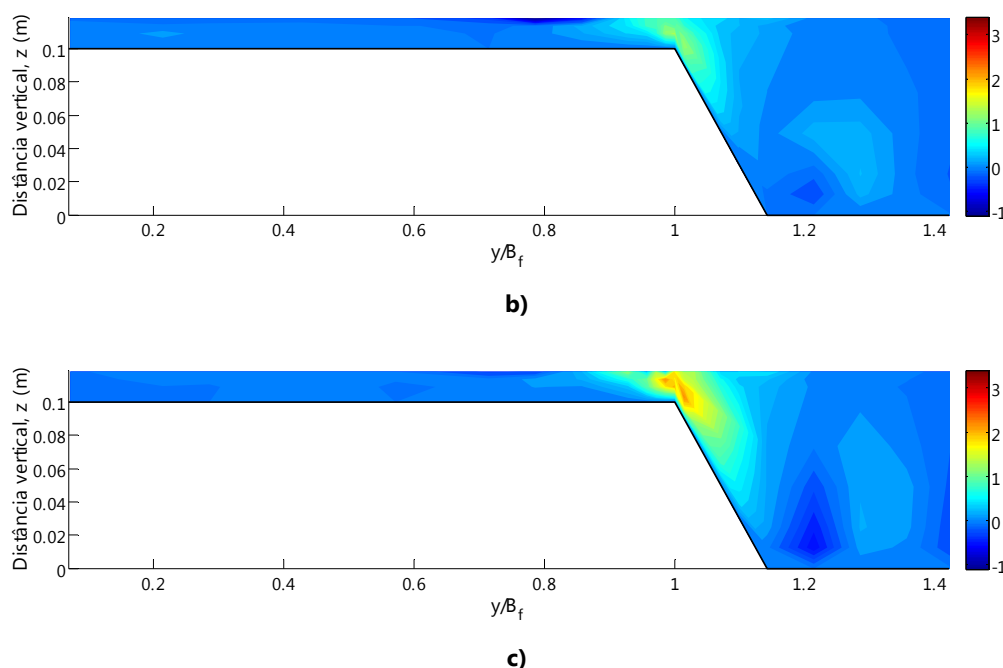


Figura 5.11 - Isolinhas das tensões de Reynolds τ_{xy} (Pa) em regime uniforme - $h_r=0,20$ em fundo liso para: a) Secção X3000; b) Secção X5000; e c) Secção X7500.

De forma a finalizar o presente subcapítulo, falta apresentar os resultados para a altura relativa $h_r=0,30$, onde é apresentada uma nova secção transversal, medida numa posição mais a montante (X1100), tornando mais completa a análise que se pretende efectuar do escoamento.

De um modo geral, os cálculos feitos para determinação dos caudais presentes no canal, resultaram em valores não muito distantes dos que foram impostos. O maior diferencial apurado, situa-se nos 2,26%, numa posição situada mais a montante (X3000), ainda antes de se chegar a meio do canal, onde, possivelmente se verificava ainda grande transferência de massa, resultando, dessa forma, num escoamento relativamente instável, potenciando diferenças maiores entre os dois caudais, que se esperam mínimas.

Quadro 5.5 – Caudais (l/s) obtidos experimentalmente em regime uniforme – $h_r=0,30$ em fundo liso.

Secções transversais (mm)	Caudal (l/s)			Diferença entre caudal experimental e imposto
	LC	LP	Total	
X1100	26,281	53,892	80,173	-0,53%
X3000	26,199	52,579	78,778	-2,26%
X5000	26,820	53,542	80,362	-0,30%
X7500	25,345	54,246	79,590	-1,25%

Como foi já explicitado ao longo deste subcapítulo, pretende-se ter uma distribuição dos dados idêntica entre as velocidades médias em termos temporais a 40% da altura de água, e uma média segundo a Equação (4.1) da velocidade que contabiliza todas as alturas de água da malha de medição para um ponto Y de medição. Na Figura 5.12 é possível verificar a semelhança entre os dois valores. Sendo assim a velocidade determinada para 40% da altura de água, irá corresponder à média das velocidades em profundidade. Recorreu-se à secção $X7500$, pois sendo a secção mais a jusante, deverá ser a que se encontra mais desenvolvida, estável e em equilíbrio.

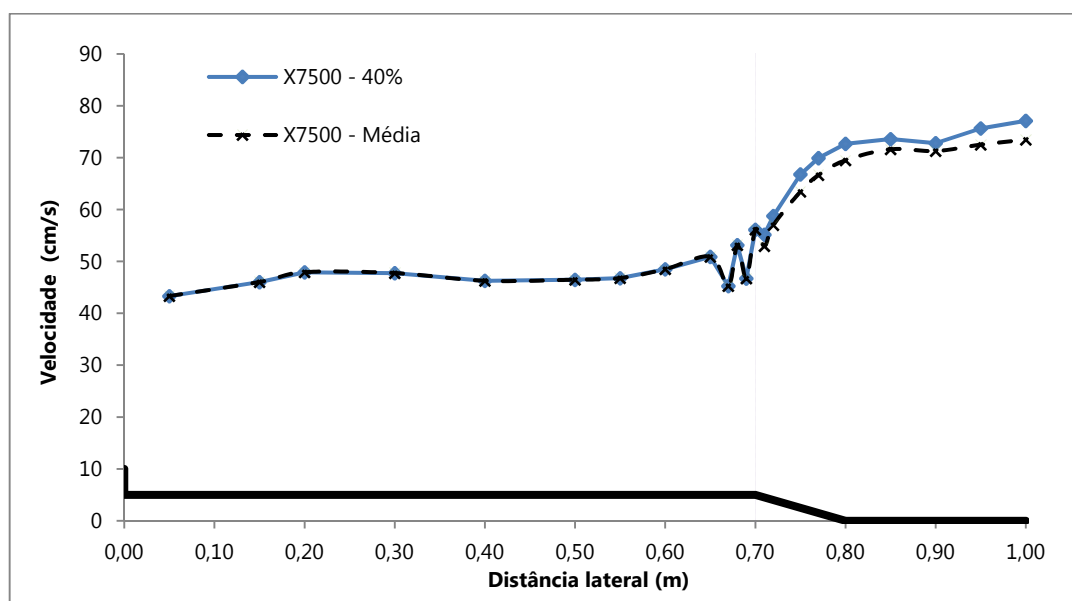


Figura 5.12 - Distribuição transversal das velocidades longitudinais a 40% da altura de água e da velocidade média segundo o método de integração em profundidade - $h_r=0,30$ em fundo liso na secção $X7500$.

Também para esta altura relativa se verifica um comportamento relativamente semelhante das velocidades longitudinais em todo o canal (Figura 5.13), embora se processe de uma forma contrária ao que seria de esperar para o desenvolvimento da camada de mistura na interface, tal como verificado para as outras duas alturas relativas analisadas neste subcapítulo. Face a $h_r=0,15$ e a $h_r=0,20$, $h_r=0,30$ apresenta maiores valores de velocidade nos dois leitos, mas é de notar que no centro do canal principal o valor das velocidades tende para uma uniformização, apresentando pouco aumento de $h_r=0,20$ para $h_r=0,30$. O aumento das velocidades ao longo das várias alturas relativas é percentualmente superior no leito de cheia.

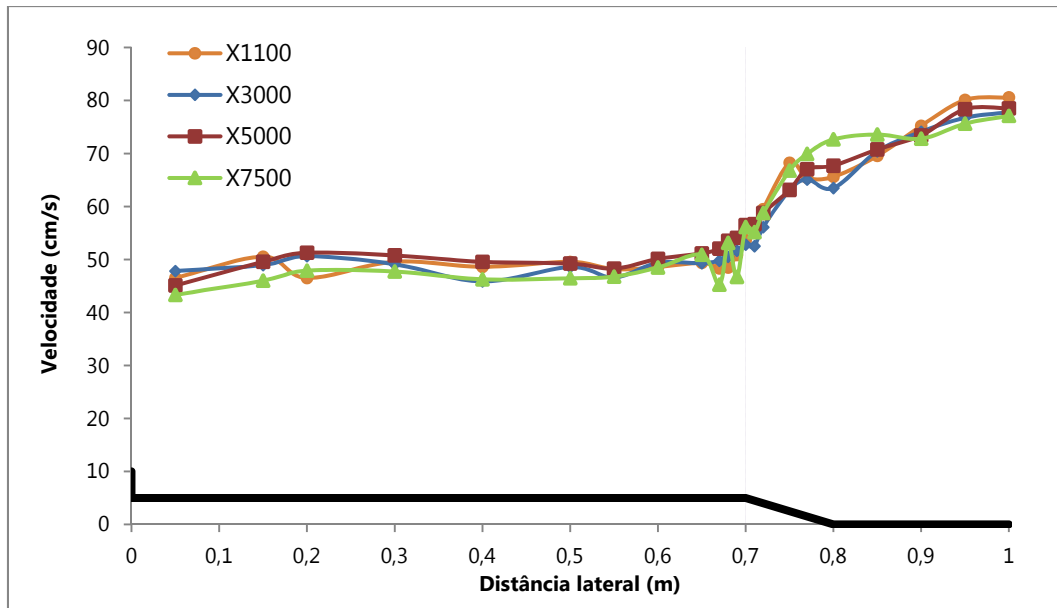


Figura 5.13 - Distribuição transversal das velocidades médias em profundidade em regime uniforme - $h_r=0,30$ em fundo liso.

Os perfis verticais da Figura 5.14 têm um desenvolvimento similar àquele verificado para a altura relativa $h_r=0,20$, contudo, evidenciam valores de velocidade um pouco maiores. Mais uma vez se verifica um comportamento logarítmico por parte dos perfis, principalmente na secção *X7500*, e o desenvolvimento da camada limite, de montante para jusante.

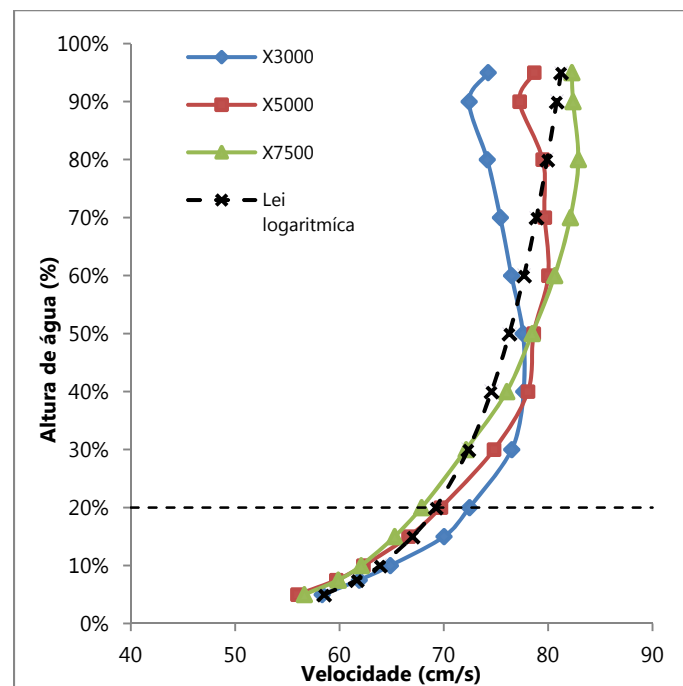
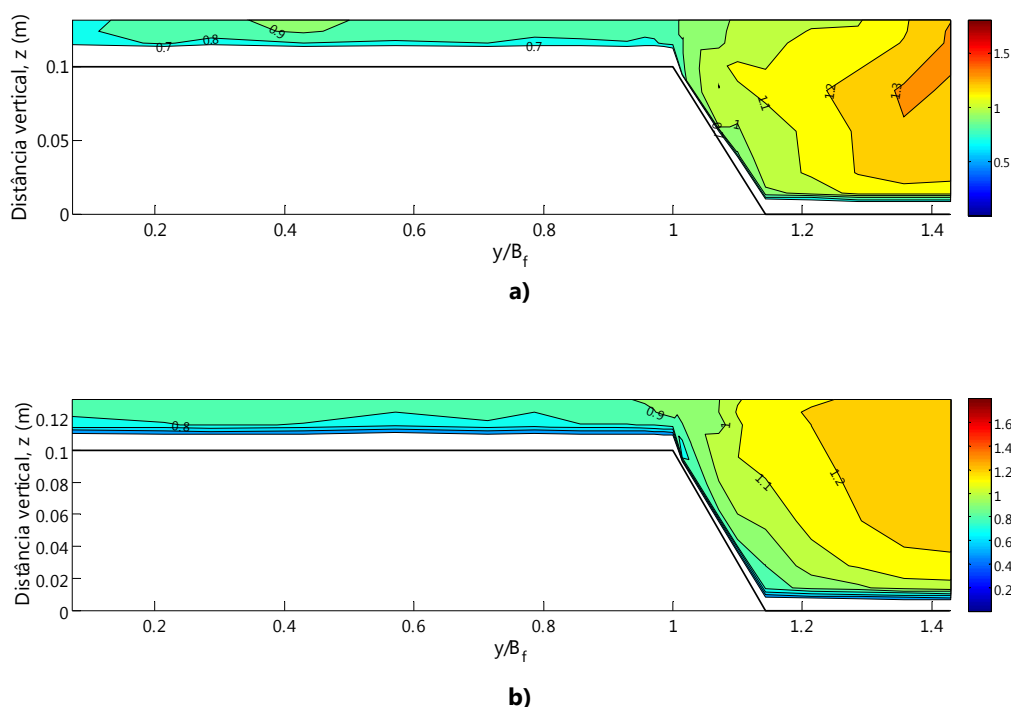


Figura 5.14 - Perfis verticais de velocidade longitudinal para $Y=100$ (cm) em regime uniforme - $h_r=0,30$ fundo liso

Desta feita, foram introduzidas as isolinhas para a secção *X1100*. Face às secções subsequentes, esta apresenta sinais de maior instabilidade, visíveis no comportamento algo irregular por parte das isolinhas, reflectindo, possivelmente, o facto de a sua posição ser muito próxima do início do canal, onde ainda não há uma estabilização total do escoamento, bem como da interacção entre os dois leitos.

Todavia, as restantes isolinhas apresentam um desenvolvimento que sugere estar de acordo com o regime uniforme que se pretendeu implementar, tendo em conta que o seu comportamento e valor encerram várias semelhanças. A interpretação da secção mais a jusante, *X7500*, sugere, mais uma vez, e de uma forma mais contundente do que as restantes secções, a presença de correntes secundárias (Figura 5.15 (e)), que têm vindo a ser referenciadas no decorrer deste subcapítulo, embora pareçam apresentar-se para esta altura relativa, menos intensas.

Com a razão entre as alturas de água a aumentar de $h_r=0,15$ até $h_r=0,30$, verifica-se a propagação das maiores velocidades no leito principal para o leito de cheia, existindo uma uniformidade maior das velocidades em toda a secção, sobretudo na interface dos dois leitos. Comparando $h_r=0,30$ a $h_r=0,15$ observa-se um desenvolvimento menos evidente da camada de mistura na interface dos dois leitos, o que indica uma menor transferência de massa entre leitos e vórtices de eixo vertical de menor intensidade e diâmetro na fronteira entre leitos. Este factos são verificados mais à frente, quando se expuserem as tensões de Reynolds, com valores mais baixos para esta altura relativa, e ainda nas Figura 8.1 e Figura 8.2 em anexo.



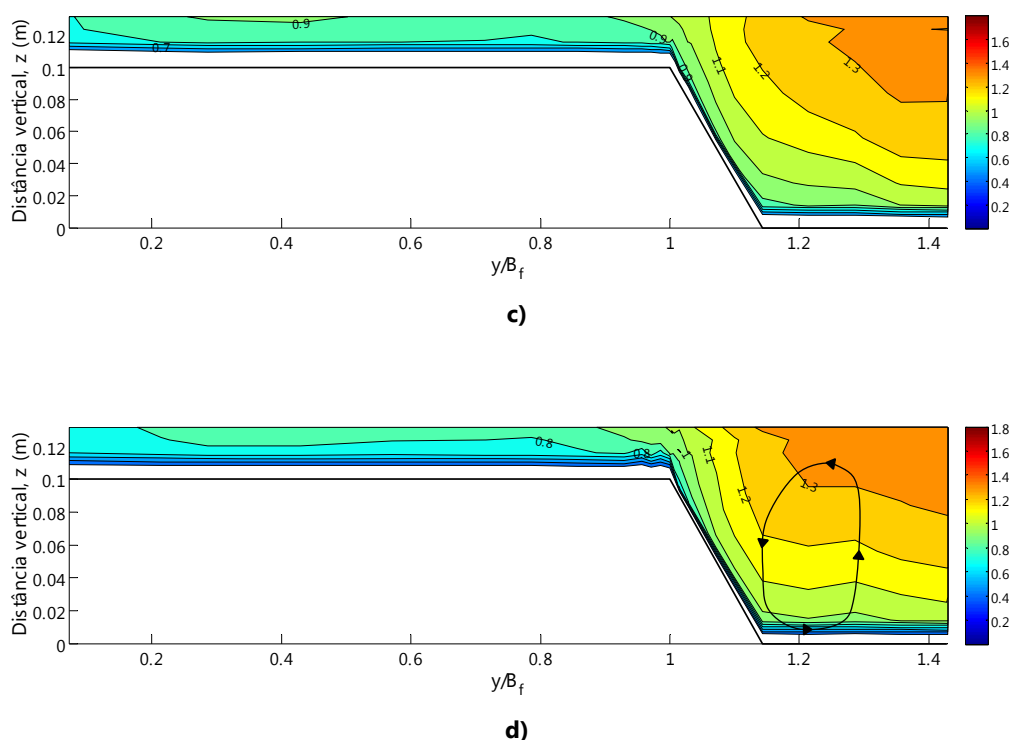


Figura 5.15 - Isolinhas da velocidade U/U_s , em regime uniforme - $h_r=0,30$ em fundo liso para: a) Secção X1100; b) Secção X3000; c) Secção X5000; e d) Secção X7500 com esquema do vórtice de eixo horizontal.

Relativamente às velocidades transversais, identificam-se no leito de cheia valores de velocidade relativamente mais baixos junto ao fundo, ao contrário do que acontece em zonas mais perto da superfície. Da mesma forma, observa-se, ainda no leito de cheia da secção X5000, junto ao bordo esquerdo em zonas perto do fundo, velocidades negativas, e positivas junto à superfície livre (Figura 5.16 (c)), factos que sugerem a ocorrência de correntes secundárias nesta planície.

Por outro lado, na zona correspondente ao leito principal, além das velocidades aumentarem substancialmente, têm uma disposição bastante padronizada no seguimento das três secções mais a jusante. Para $h_r=0,30$, não é tão evidente, como nas duas alturas relativas anteriores já analisadas, a presença de correntes secundárias de eixo horizontal, segundo uma interpretação das isolinhas de V . O comportamento destas sugere, em hipótese, que se desenvolve uma célula de maiores dimensões, que se propaga pela secção toda. Neste caso não é possível fazer tal análise em pormenor, pelo facto de terem sido medidas velocidades apenas em meia secção.

Os vórtices de eixo vertical na interface onde se encontram os dois escoamentos deixam de ser nítidos para esta altura relativa, o que vai de encontro às conclusões de Nezu *et al.* (1999), que aponta para um enfraquecimento destes vórtices com o aumento da altura relativa.

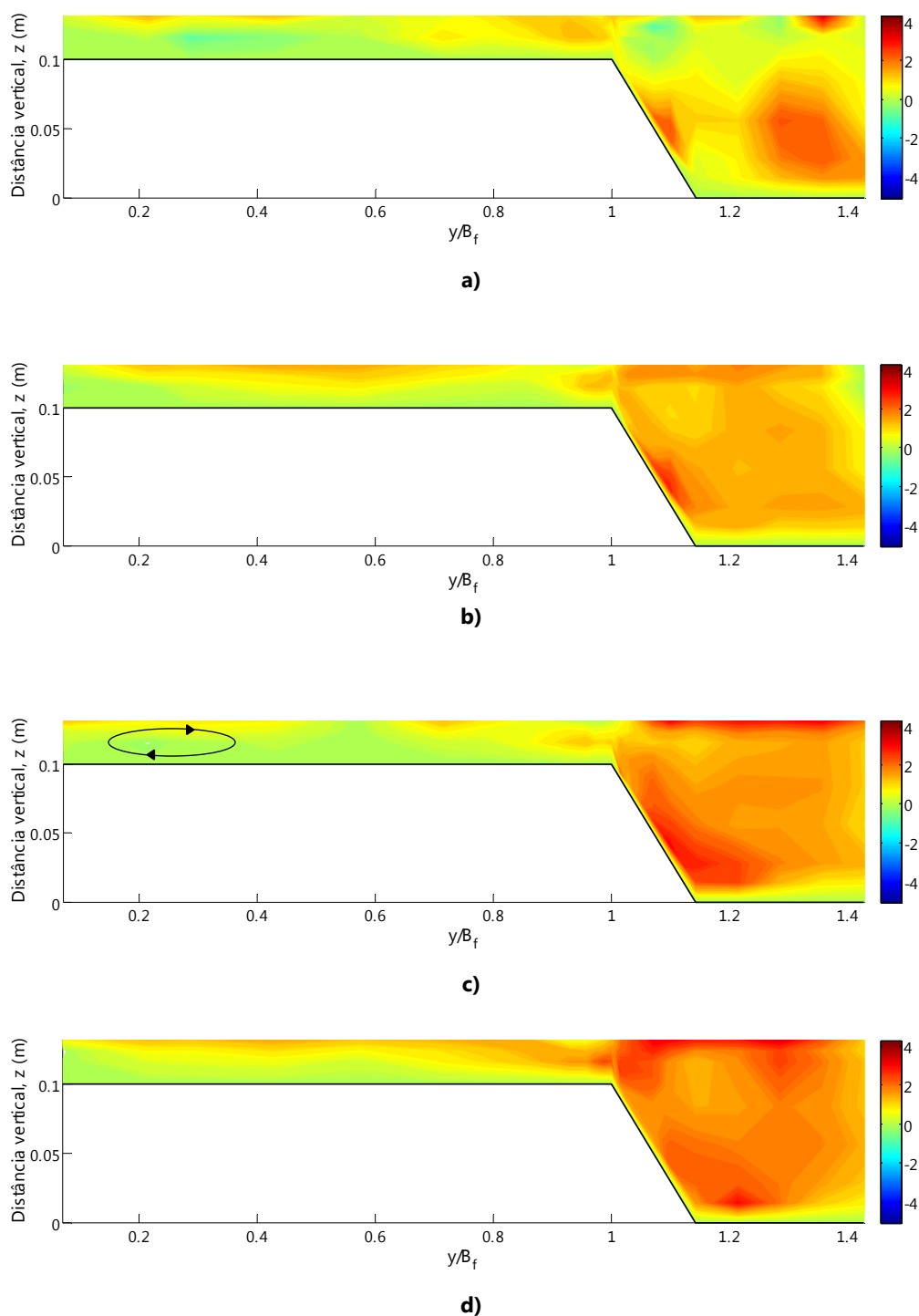
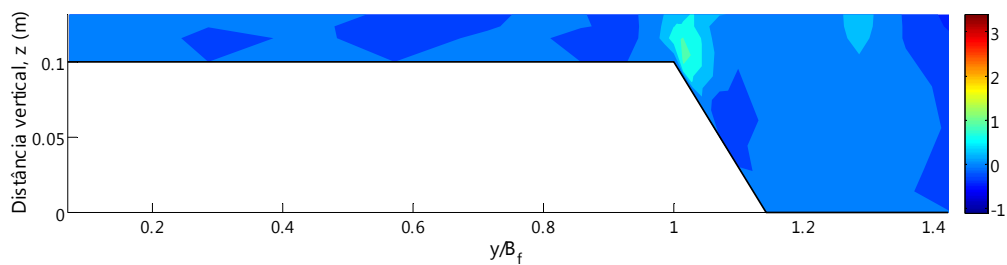


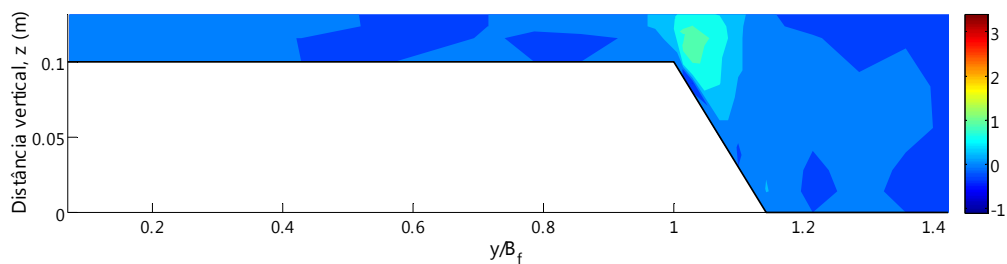
Figura 5.16 - Isolinhas das velocidades transversais (cm/s) em regime uniforme - $h_r=0,30$ em fundo liso para: a) Secção X1100; b) Secção X3000; c) Secção X5000 com esquema do vórtice de eixo horizontal; e d) Secção X7500.

De modo a finalizar a análise que tem vindo a ser desenvolvida para o regime uniforme, falta somente apresentar as isolinhas das tensões τ_{xy} (Figura 5.17).

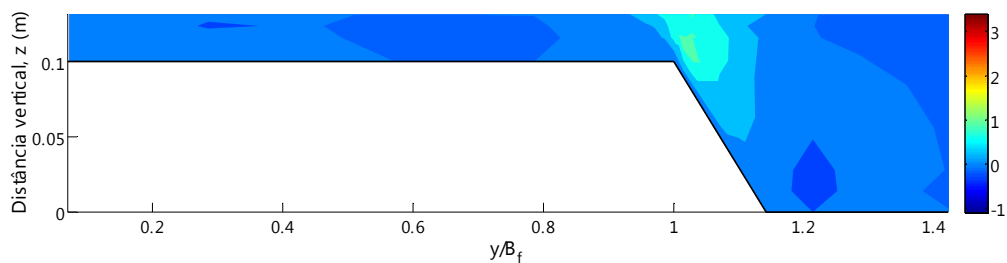
Como seria expectável, nas zonas mais turbulentas do escoamento temos as maiores tensões, concentradas, na sua maioria, na zona onde os dois escoamentos se cruzam, ou seja, na zona de maior turbulência, deixando ainda perceptível o crescimento da camada de mistura. É ainda de notar, que à medida que a altura de água, no leito de cheia, aumenta, as tensões na zona que limita os dois escoamentos de velocidades diferentes diminuem. Com uma altura relativa maior e nas mesmas condições de escoamento, o leito de cheia apresentará velocidades maiores, como se pôde verificar nas análises realizadas até agora, fazendo com que a interacção gerada entre o escoamento dos dois leitos tenha um diferencial de velocidades menor, resultando em menos turbulência, e consequentemente menores valores de tensões.



a)



b)



c)

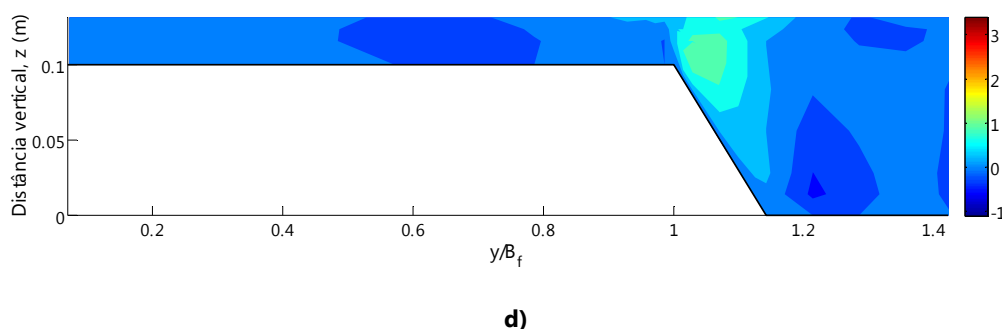


Figura 5.17 - Isolinhas das tensões de Reynolds τ_{xy} (Pa) em regime uniforme – $h_r=0,30$ em fundo liso para: a) Secção X1100; b) Secção X3000; c) Secção X5000; d) Secção X7500.

5.1.2 Regime Não Uniforme - $h_r=0,20$ / $h_r=0,30$

Com o intuito de se estudar a capacidade de vazão do canal, de uma forma mais abrangente, foram também impostas condições de escoamento não uniformes, tanto para $h_r=0,20$ como para $h_r=0,30$ em fundo liso, fazendo-se variar a percentagem de caudal que é direccionado para os leitos de cheia, mantendo-se sempre o caudal total, determinado para o regime uniforme. Se, por exemplo, se quiser impor o regime não uniforme ao canal em mais 19%, alimentam-se os leitos de cheia com mais 19% de caudal, face ao caudal para o leito de cheia em regime uniforme. Este novo valor de caudal para o leito de cheia é subtraído ao caudal total, obtendo-se, desta forma, o caudal para o leito principal. Para as percentagens de mais 38% e 53%, bem como menos 19%, segue-se o mesmo método de cálculo dos caudais. Os caudais determinados estão presentes no Quadro 5.6.

Quadro 5.6 – Caudais (l/s) impostos para obtenção do regime não uniforme - Fundo liso

Altura relativa	Regime	Caudal (l/s)		
		LC	LP	Total
0,2	-19%	9,1	44,3	53,4
	Uniforme	11,2	42,2	
	19%	13,3	40,1	
	38%	15,5	37,9	
	53%	17,1	36,3	
0,3	-19	21,4	59,2	80,6
	Uniforme	26,4	54,2	
	19%	31,4	49,2	
	38%	36,4	44,2	
	53%	40,4	40,2	

No Quadro 5.7 apresentam-se as alturas de água médias na transversal, medidas nos leitos de cheia e leito principal, ao longo da secção X5000. Verifica-se que, relativamente ao regime uniforme, a subalimentação dos leitos de cheia (-19%) e a sobrealimentação (+19%, +38% e +53%) provocam, respectivamente, uma diminuição e um aumento da altura de água média.

Quadro 5.7 – Alturas (cm) médias de água transversais em regime não uniforme – Fundo liso

Altura relativa	Regime	Secção transversal (mm)
		X5000
0,2	-19%	2,12
	Uniforme	2,27
	19%	2,32
	38%	2,37
	53%	2,47
0,3	-19	3,85
	Uniforme	4,01
	19%	4,05
	38%	4,08
	53%	4,10

A implementação de regimes não uniformes possibilita estudar o cenário que mais se verifica na realidade, pois encontrar-se um regime uniforme num rio natural, é pouco provável.

A análise, que se inicia agora, manterá um tipo de estrutura muito similar àquela a que se recorreu no subcapítulo anterior.

Em primeiro lugar podem ser observados os perfis de velocidade média em profundidade (Figura 5.18) para cinco regimes de escoamento, o uniforme, e quatro regimes não uniformes, com diferentes percentagens de alimentação ao leito de cheia, -19%, +19%, +38% e +53%. O aumento de caudal nos leitos de cheia reflecte-se, em primeiro lugar, num aumento previsível das velocidades nestes leitos. Verifica-se na figura que as menores velocidades nos leitos de cheia são as representadas pela série de dados referente ao regime -19%. No outro extremo, ao regime +53%, correspondem as velocidades mais elevadas. Consta-se que as velocidades no leito principal seguem o caminho oposto. As diferenças verificadas entre estas duas percentagens situam-se em cerca de 10 (cm/s) no leito de cheia e de 5 (cm/s) no leito principal.

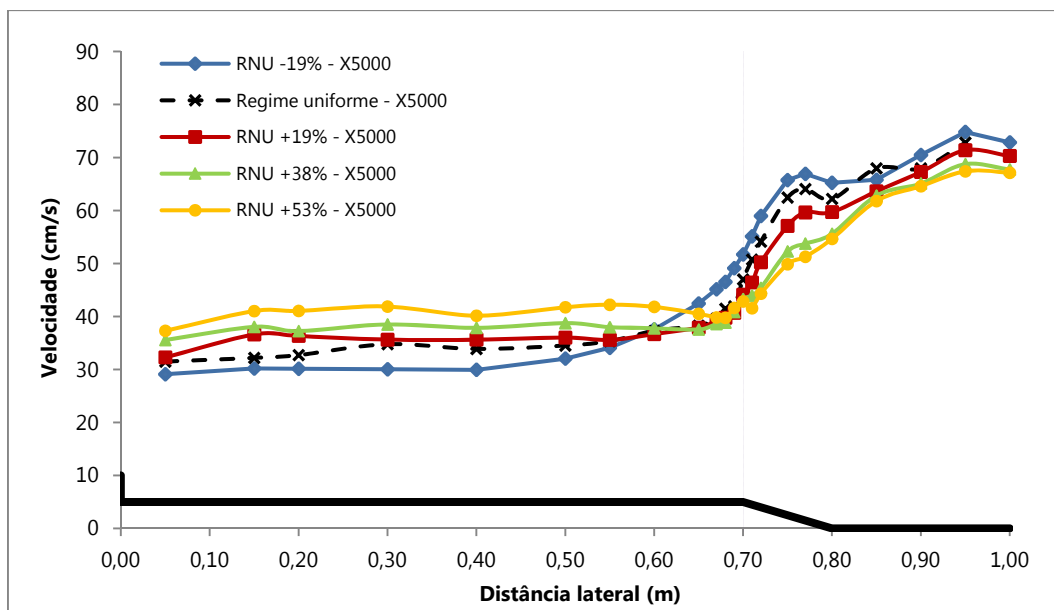


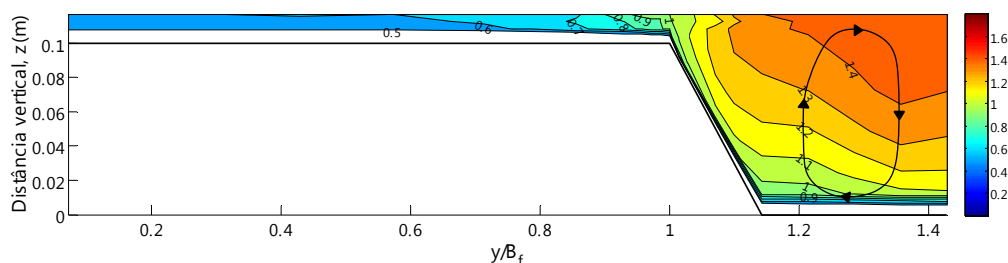
Figura 5.18 - Distribuição transversal das velocidades médias em profundidade para vários regimes de escoamento não uniforme para a secção X5000 - $h_r=0,20$ em fundo liso

As isolinhas das velocidades para a secção transversal X5000 são apresentadas na Figura 5.19. As menores percentagens nos vários regimes não uniformes têm valores menos elevados no leito de cheia e maiores no leito principal, como tinha sido já verificado nas médias de U em profundidade. Por outro lado, as maiores percentagens apresentam maiores velocidades no leito de cheia e menores no leito principal.

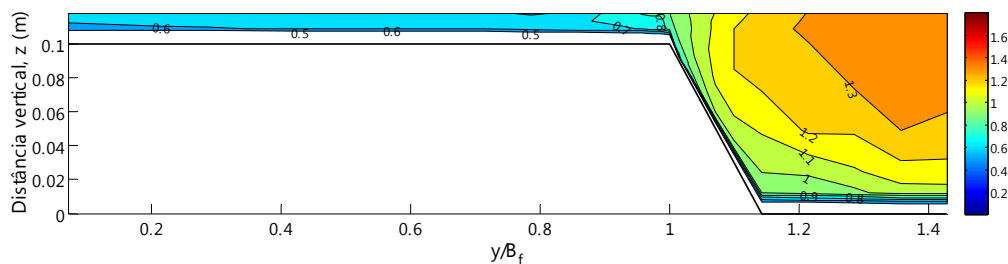
O facto de serem impostos diferentes caudais em cada leito, impõe ao escoamento um comportamento que difere do expectável num regime uniforme. Uma destas diferenças incide no facto de ocorrerem mais transferências de massa entre os leitos, de forma a serem compensadas as desigualdades de caudal introduzidas. A Figura 5.19 (a), que corresponde às isolinhas do regime -19%, é possível identificar a transferência de massa do leito principal para o leito de cheia, através do comportamento das isolinhas. Existindo menos quantidade de água na planície de inundação, relativamente a um escoamento com características uniformes, vai existir uma tentativa de equilíbrio por parte do leito principal, originando o movimento de partículas da direita para a esquerda. No sentido oposto, nas percentagens positivas +19, +38% e +53%, o comportamento das isolinhas não ocorre do mesmo modo, pois, nestes casos, espera-se que a transferência de massa se proceda do leito de cheia para o leito principal. No entanto, o facto de no centro do canal se desenvolverem velocidades substancialmente mais elevadas face às presentes no leito de cheia, poderá originar uma certa resistência na penetração de partículas que se desloquem da planície de inundação para o leito principal, não sendo dessa forma, tão evidente, como a transferência de massa no sentido contrário.

As transferências de massa descritas no parágrafo anterior sugerem a alteração dos vórtices de eixo vertical na zona da interface das duas planícies, que, à partida, serão mais intensos para -19%, devido ao facto das partículas se propagarem mais facilmente do leito principal, com valores de velocidade substancialmente mais elevados, para o de cheia. Diga-se, neste propósito, que a referida transferência de massa mais intensa para -19%, evidencia um desenvolvimento mais acentuado da camada de mistura.

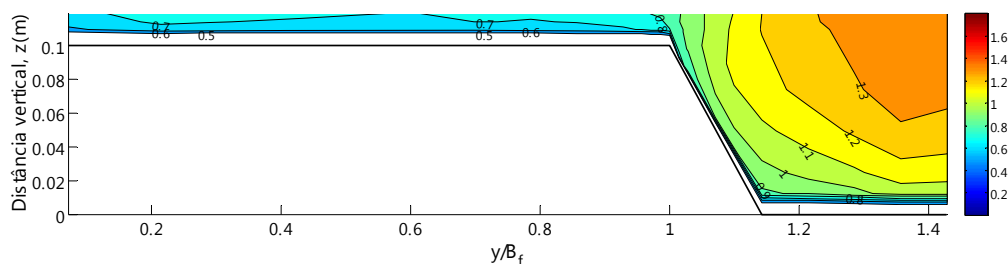
É ainda possível verificar o desenvolvimento de células secundárias no leito principal, que perdem intensidade à medida que é imposta mais quantidade de massa no leito de cheia, e ainda uma deslocação dessas mesmas células secundárias para o leito de cheia, no sentido da transferência de massa, principalmente para as isolinhas de -19% (Figura 5.19 (a)).



a)



b)



c)

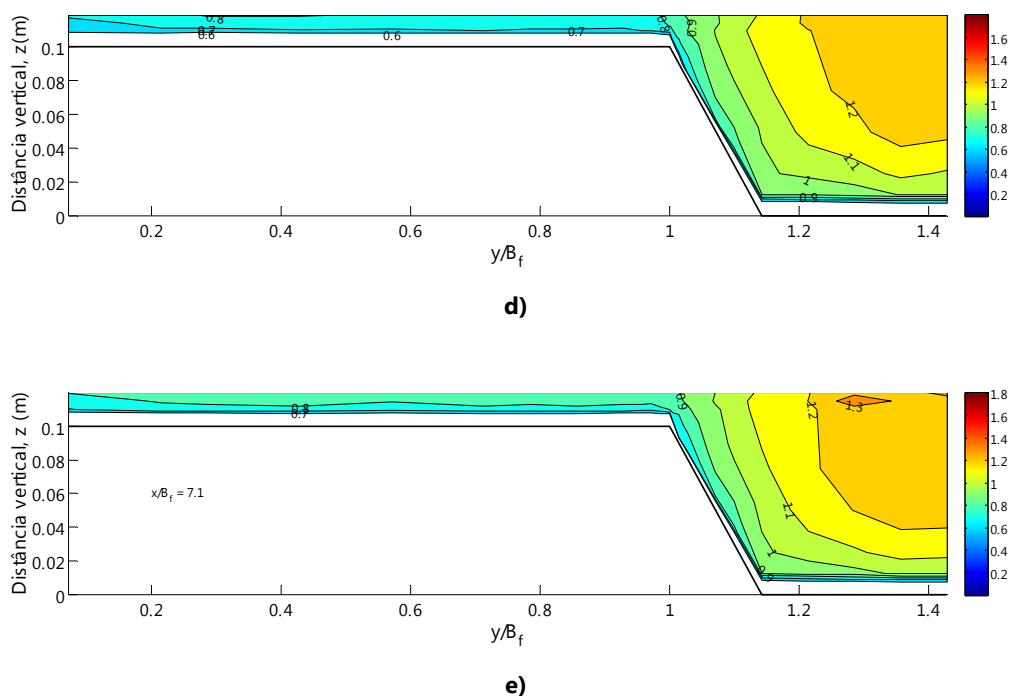
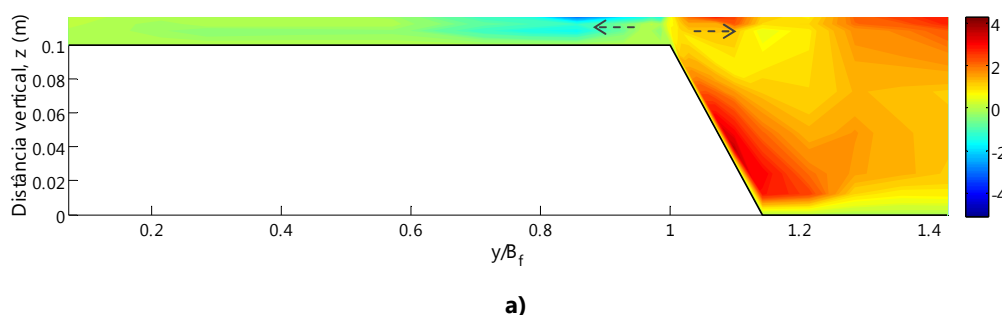


Figura 5.19 - Isolinas da velocidade U/U_s para a secção X5000 em regime não uniforme - $h_r=0,20$ em fundo liso para: a) Regime -19% com esquema do vórtice de eixo horizontal; b) Regime Uniforme; c) Regime +19%; d) Regime +38%; e e) Regime +53%.

As velocidades transversais (Figura 5.20) têm um comportamento que vai de encontro à distribuição das velocidades longitudinais, pois verifica-se, nas percentagens mais baixas de alimentação, um aumento do valor de velocidades, neste caso transversais, no leito principal, e para as maiores percentagens velocidades relativamente maiores no leito de cheia.

Outro facto identificado prende-se com as transferências de massa entre os leitos. Quando se dá o aumento de caudal no leito de cheia, parece verificar-se uma migração de massa do leito de cheia para o leito principal.



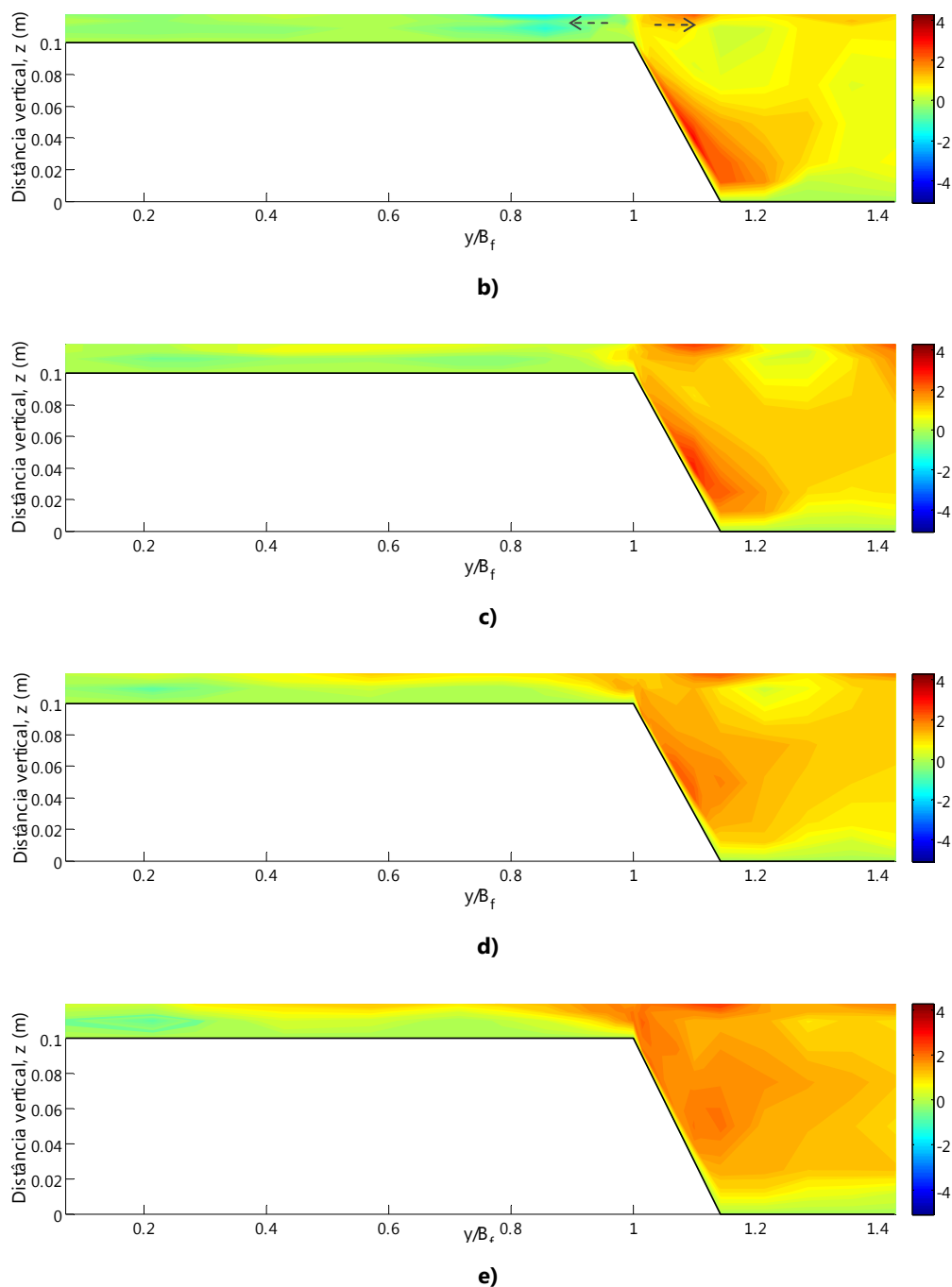
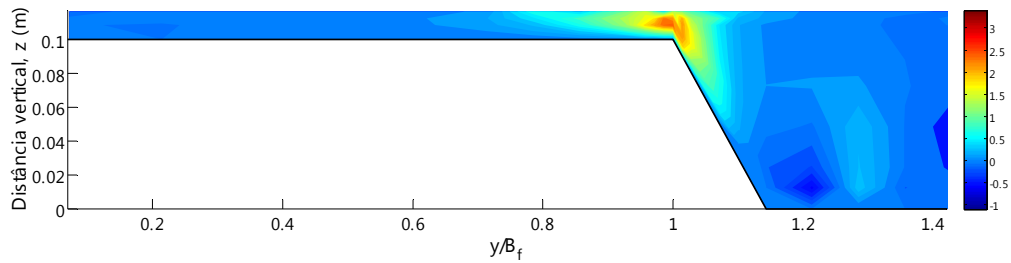


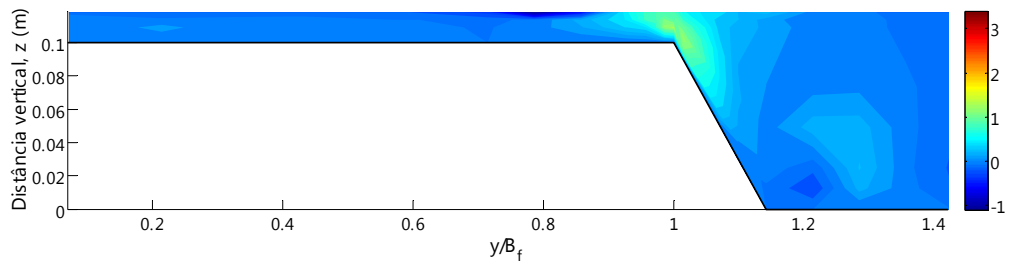
Figura 5.20 - Isolinhas das velocidades transversais (cm/s) para a secção X5000 em regime não uniforme - $h_r=0,20$ em fundo liso para: a) Regime -19%; b) Regime Uniforme; c) Regime +19%; d) Regime +38%; e e) Regime +53%.

Relativamente às tensões de Reynolds (Figura 5.21) é possível verificar claramente a diminuição dos valores da mesma, da maior percentagem para a menor percentagem de caudal no leito de cheia, principalmente na interface dos dois leitos, sugerindo, desta forma, que o aumento da velocidade do leito de cheia, decorrente de um aumento de caudal, vai diminuir a diferença de velocidade entre os escoamentos em cada leito, havendo a diminuição da

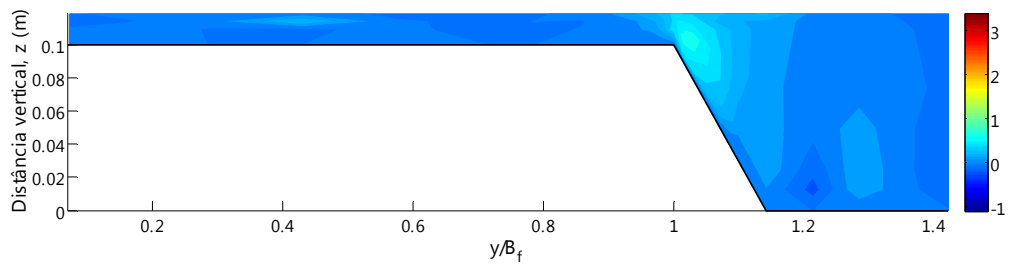
transferência de massa e de turbulência na interface e, consequentemente, das tensões. A este propósito, é de realçar o grande aumento de tensões na interface dos dois leitos no regime -19% (Figura 5.21 (a)).



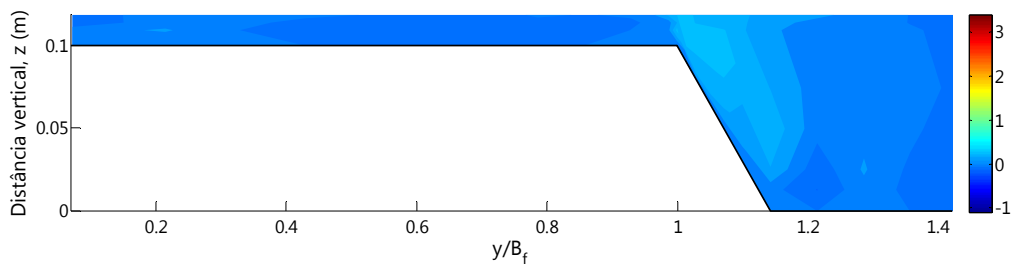
a)



b)



c)



d)

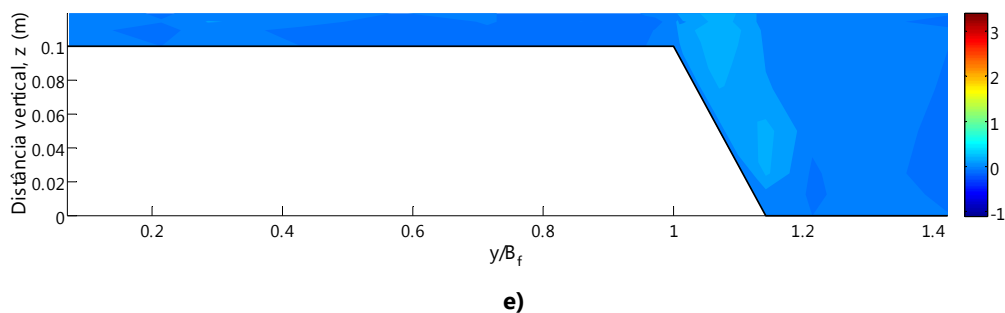


Figura 5.21 - Isolinhas das tensões de Reynolds τ_{xy} (Pa) para a secção X5000 em regime não uniforme - $h_r=0,20$ em fundo liso para: a) Regime -19%; b) Regime Uniforme; c) Regime +19%; d) Regime +38%; e e) Regime +53%.

Nas próximas páginas irão ser apresentados os resultados obtidos para a altura relativa $h_r=0,30$.

De um modo geral, a Figura 5.22 atesta que nas maiores percentagens de caudal temos os valores mais elevados de velocidade no leito de cheia, acontecendo o contrário no leito principal, ficando evidente as diferenças estabelecidas pelos vários regimes não uniformes, em termos de velocidade longitudinal.

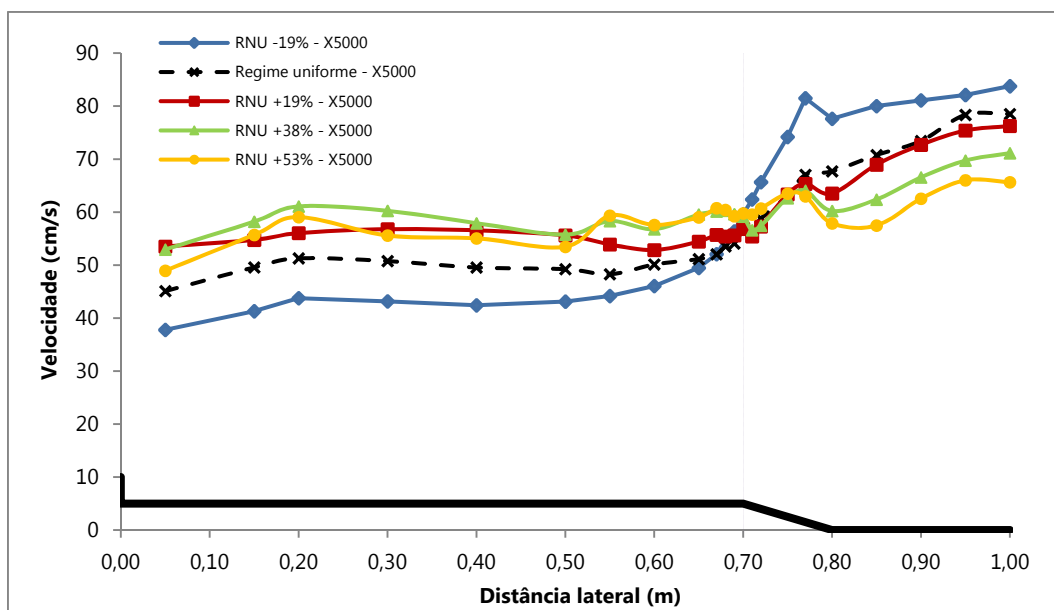
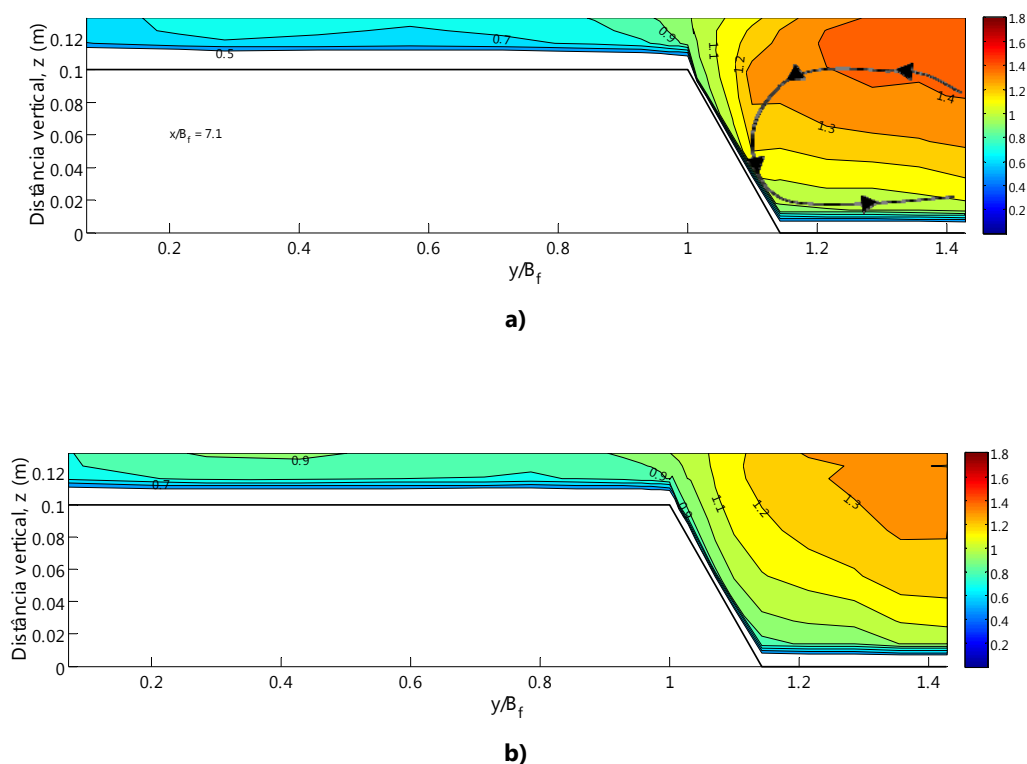


Figura 5.22 - Distribuição transversal das velocidades médias em profundidade para vários regimes de escoamento não uniforme para a secção X5000 - $h_r=0,30$ em fundo liso.

A distribuição das isolinhas da velocidade longitudinal (Figura 5.23) nas secções transversais reforçam o que foi dito no parágrafo anterior em relação às médias da velocidade em profundidade. Verifica-se assim o mesmo padrão de comportamento.

Ao contrário da $h_r=0,20$, para sobrealimentação +38% e +53%, nesta altura relativa, é possível identificar que à medida que se impõe mais caudal no leito de cheia, a velocidade que escoar no leito principal apresenta valores menores de velocidade e que existem partículas que se deslocam a velocidade mais elevada, 1,1, nos dois leitos, existindo uma maior uniformidade de partículas com a mesma velocidade em toda a secção transversal. Tal ocorre devido à maior altura de água no leito de cheia, que promove uma interação, entre as duas planícies, menos turbulenta, com maior facilidade de permutas de massa, determinando um equilíbrio de matéria com menos obstáculos, apontando ainda para uma diminuição no desenvolvimento da camada de mistura. Mesmo assim, é possível observar na Figura 5.23 (a) um comportamento típico da camada de mistura na interface das subsecções, devido à menor alimentação imposta no leito de cheia.

As isolinhas não sugerem, principalmente na Figura 5.23 (c), (d) e (e), o desenvolvimento de correntes secundárias muito intensas, no leito principal, corroborando o que foi dito no parágrafo anterior. Observa-se na Figura 5.23 (a) uma célula secundária, com um comportamento algo diferente daqueles que se têm vindo a identificar até agora.



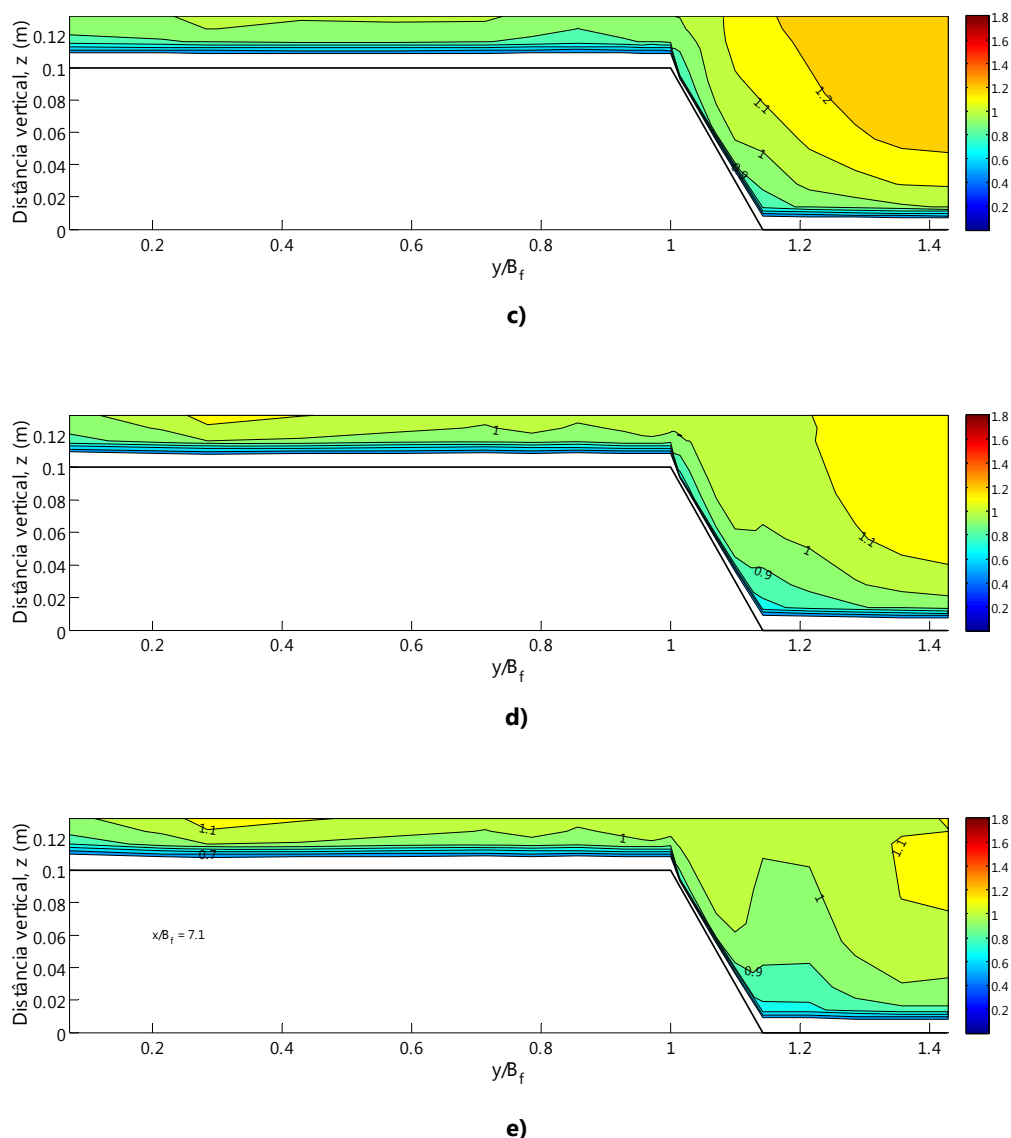


Figura 5.23 - Isolinhas da velocidade U/U_s para secção X5000 em regime não uniforme - $h_r=0,30$ em fundo liso para: a) Regime -19% com esquema do vórtice de eixo horizontal; b) Regime Uniforme; c) Regime +19%; d) Regime +38%; e e) Regime +53%.

Nas figuras seguintes estão as isolinhas das velocidades transversais para vários regimes, na secção X5000. É possível identificar que, para -19%, existe transferência de massa do leito principal para o leito de cheia, havendo um comportamento no sentido de equilibrar o menor caudal na planície de inundação. No sentido contrário, nas maiores percentagens, a transferência de massa ocorre no sentido inverso. De uma forma geral em todos os regimes parece conseguir-se identificar correntes secundárias de eixo horizontal nos dois leitos, sendo que, na Figura 5.24 (a) encontra-se bem patente a célula secundária identificada na Figura 5.23 (a).

Comparativamente a $h_r=0,20$ no regime -19% (Figura 5.20 (a)) pode-se constatar que as transferências de massa entre leitos são maiores para $h_r=0,30$ para o mesmo regime.

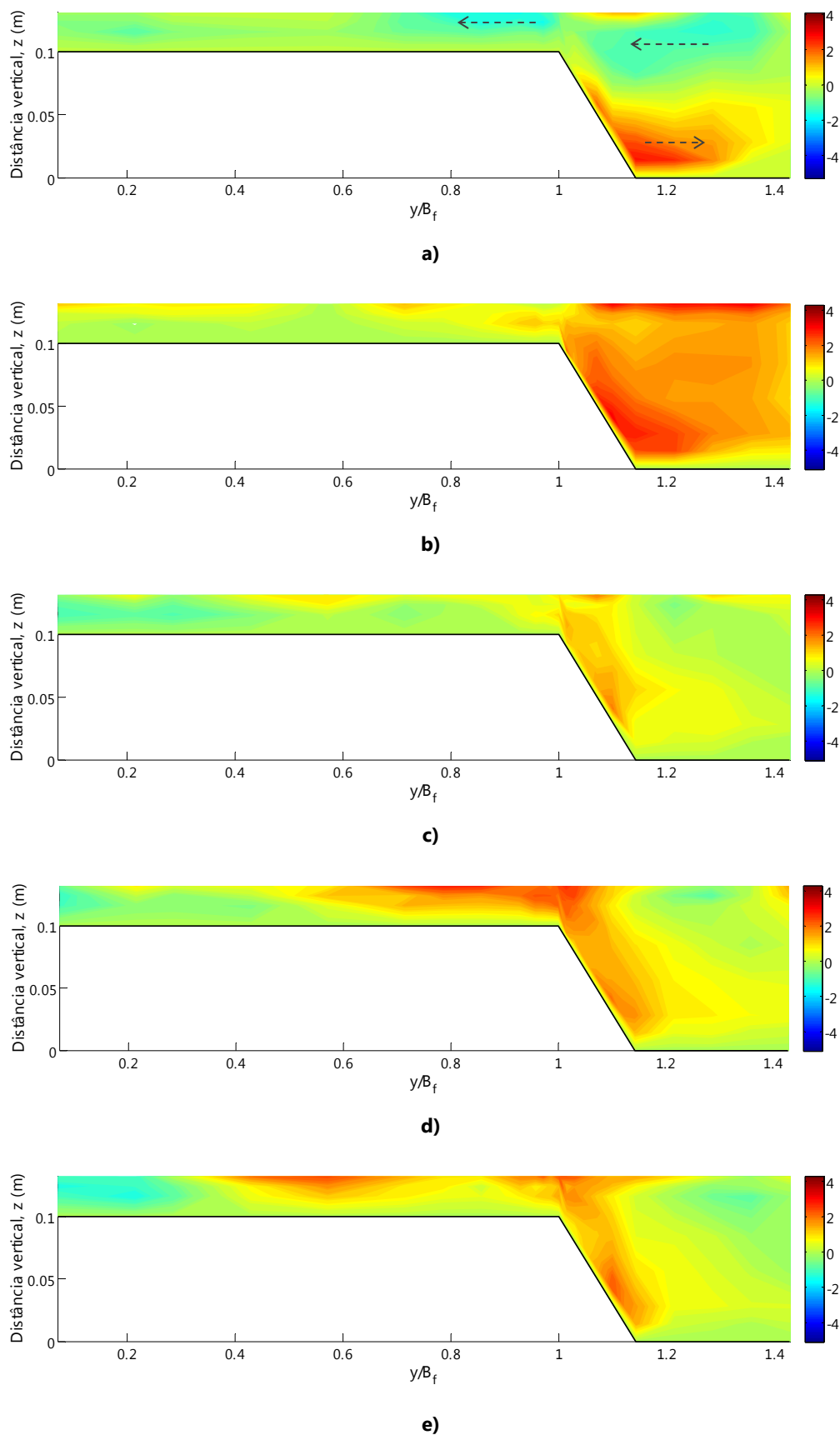
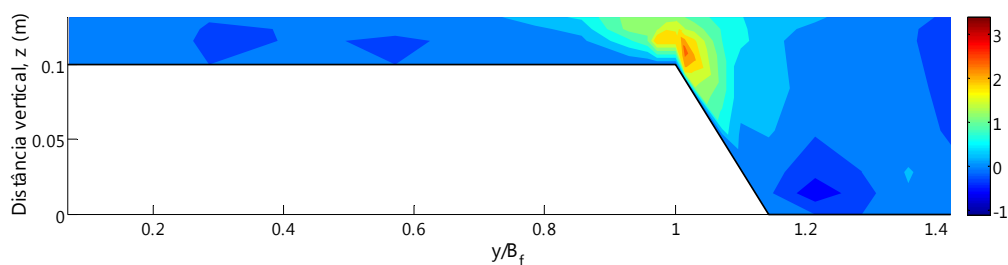
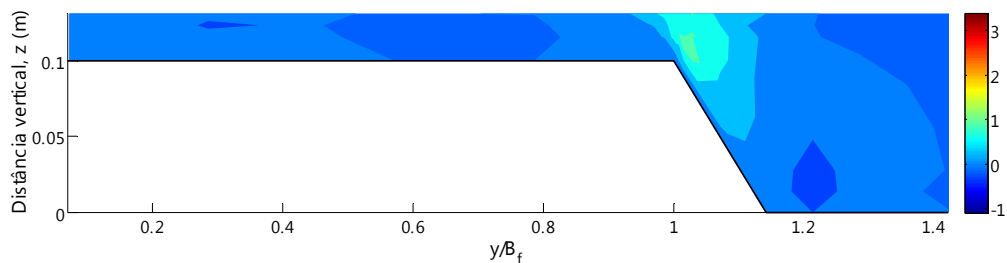


Figura 5.24 - Isolinhas das velocidades transversais (cm/s) para a seção X5000 em regime não uniforme - $h_r=0,30$ em fundo liso para: a) Regime -19%; b) Regime Uniforme; c) Regime +19%; d) Regime +38%; e e) Regime +53%.

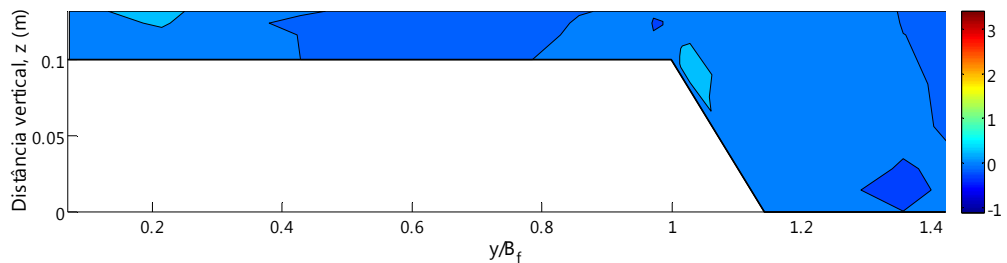
Em termos de tensões de Reynolds constata-se na interface dos dois leitos os maiores valores, sendo que, quando a transferência de massa se processa do leito principal para o leito de cheia, vai existir maior turbulência e maiores tensões na interface (-19%). Para a percentagem +53%, e de acordo também com as isolinhas de V (Figura 5.24), a transferência de massa dá-se do leito de cheia para o leito principal, resultando num comportamento menos turbulento entre os dois leitos, e menos turbulento comparando com $h_r=0,20$. É possível ainda verificar o que foi dito anteriormente para as isolinhas de U e V , principalmente, no que se refere ao menor desenvolvimento e crescimento da camada de mistura, que para percentagens de alimentação maiores, não apresenta tensões significativas na interface.



a)



b)



c)

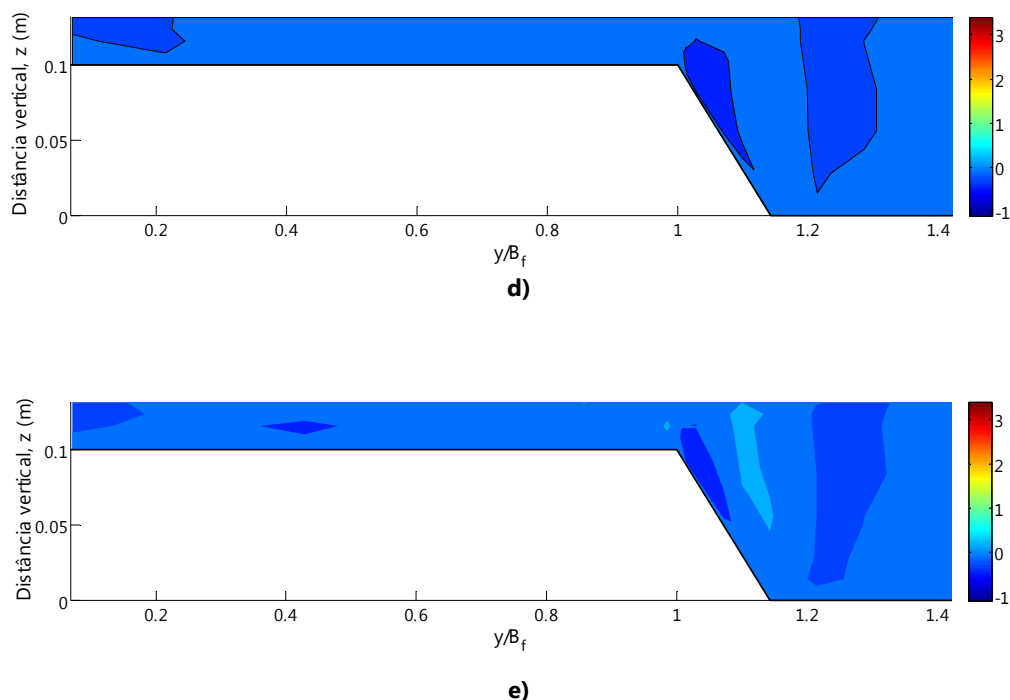


Figura 5.25 - Isolinhas das tensões de Reynolds τ_{xy} (Pa) para a secção X5000 em regime não uniforme - $h_r=0,30$ em fundo liso para: a) Regime -19%; b) Regime Uniforme; c) Regime +19%; d) Regime +38%; e e) Regime +53%.

5.2 Fundo Rugoso

5.2.1 Regime Uniforme - $h_r=0,15$ / $h_r=0,30$

De acordo com o que foi já referido ao longo desta dissertação, falta analisar os dados medidos quando o escoamento se processa sobre relva sintética nos dois leitos de cheia, com o fundo liso no leito principal. Neste canal as superfícies do leito com estas características, apelidam-se de rugosas, devido, exactamente, à irregularidade conferida pelas fibras que compõe a relva sintética, que tencionam simular o efeito da vegetação, eventualmente presente nas planícies de inundação de um rio.

Antes de ser iniciado o estudo para fundo rugoso, no Quadro 5.8 apresentam-se os caudais que implementam um regime uniforme no escoamento processado sobre o canal, e no Quadro 5.9 as alturas médias de água medidas.

Comparativamente à situação de fundo liso (Quadro 5.1), constata-se que os caudais totais, para as mesmas alturas relativas, são substancialmente inferiores nos regimes uniformes com fundo rugoso. Essa diferença aumenta percentualmente com o aumento da altura relativa, atingindo 23% no

caso de $h_r=0,30$. Verifica-se ainda que a diminuição de caudal é, em termos relativos, maior nos leitos de cheia, com variações de 44% e 37% para $h_r=0,20$ e $0,30$, respectivamente.

Estes resultados vão de encontro ao que seria expectável, dado que o aumento de rugosidade dos leitos de cheia corresponderá, para alturas de escoamento semelhantes, a capacidades de vazão inferiores.

Quadro 5.8 - Caudais (l/s) impostos para obtenção do regime uniforme - Fundo rugoso.

Altura relativa	Caudal (l/s)		
	LC	LP	Total
0,15	3,7	35,1	38,8
0,30	16,6	42,3	58,9

Comparando os resultados do Quadro 5.9 com os correspondentes a fundo liso (Quadro 5.2), conclui-se que devido ao aumento de rugosidade, as alturas de água média, para o caso rugoso, são superiores. Analisando $h_r=0,15$ são 19% superiores às de fundo liso e para $h_r=0,30$ esse valor diminui para 11%.

Quadro 5.9 – Alturas (cm) médias de água transversais em regime uniforme – Fundo rugoso.

Altura relativa	Secções transversais (mm)		
	X3000	X5000	X7500
0,15	2,06	1,98	1,99
0,30	4,58	4,46	4,48

Adoptando uma metodologia de análise em tudo semelhante ao que tem acontecido no decorrer deste capítulo, irão ser apresentados os resultados para $h_r=0,15$, em fundo rugoso, começando, assim, pelo quadro onde se inserem os caudais calculados experimentalmente, com base no escoamento de água verificado no canal.

Analisando os valores apresentados no Quadro 5.10 observa-se que o estabelecimento do regime uniforme para fundo rugoso é mais difícil do que para fundo liso (Quadro 5.3), apresentando diferenças entre caudais obtidos experimentalmente e impostos (Equação (5.1) a montante que atingem cerca de 6%. Para fundo liso esse valor ronda 1%. Este facto pode ter duas explicações, a

primeira consiste no aumento de transferências de massa entre leitos devido à rugosidade não ser homogênea. A segunda está relacionada com possíveis erros de medição da velocidade que, no caso de leito de cheia rugoso, eram mais difíceis de obter.

Quadro 5.10 – Caudais (l/s) obtidos experimentalmente em regime uniforme – $h_r=0,15$ em fundo rugoso.

Secções transversais (mm)	Caudal (l/s)			Diferença entre caudal experimental e imposto
	LC	LP	Total	
X3000	4,182	36,441	40,623	4,70%
X5000	3,810	35,291	39,102	0,78%
X7500	2,938	38,333	41,271	6,37%

De seguida, surge o perfil das velocidade médias (Figura 5.26) medidas a 40% da altura de água e o perfil das velocidade médias tendo em conta as várias percentagens de altura de água medidas, como anteriormente explicitado, demonstrando, mais uma vez, o semelhante desenvolvimento das duas distribuições de velocidade, permitindo, dessa forma, utilizar e assumir as velocidades medidas a 40% da altura de água como as velocidades médias em profundidade.

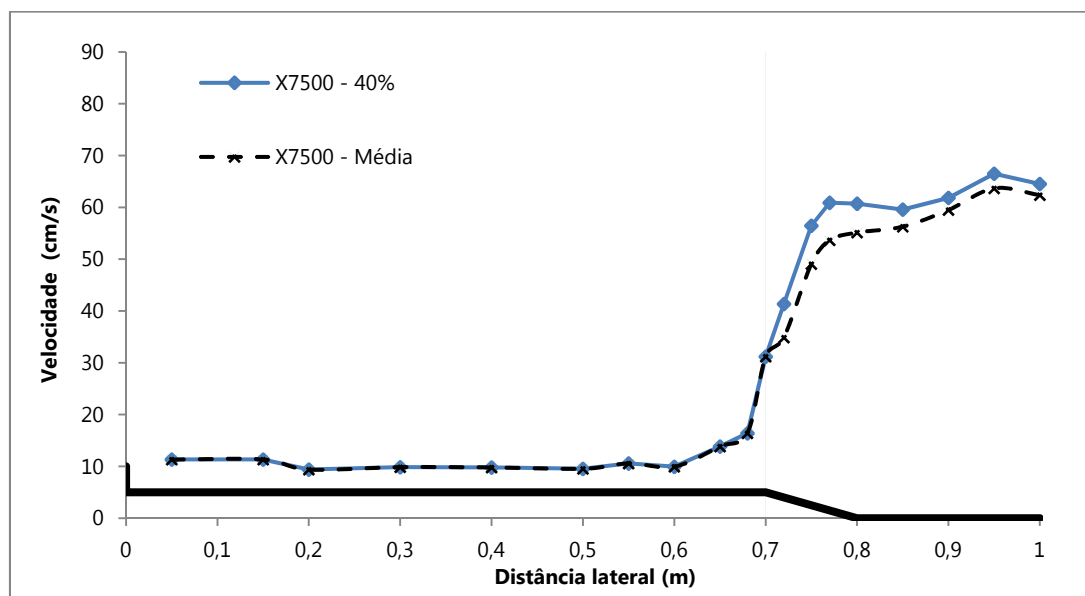


Figura 5.26 - Distribuição transversal das velocidades a 40% da altura de água e da velocidade média segundo o método de integração em profundidade - $h_r=0,15$ em fundo rugoso na secção X7500.

Com o intuito de facilitar e auxiliar a análise da distribuição das velocidades médias em profundidade em fundo rugoso, foi introduzida a série de dados correspondente às velocidades médias em profundidade em fundo liso ($h_r=0,15L$) para a mesma altura relativa, na secção transversal mais a jusante (X7500). Conforme se torna patente na Figura 5.27, confrontando o perfil em fundo liso ao do fundo rugoso, existe uma substancial desaceleração por parte das velocidades longitudinais no leito de cheia para cerca de metade, devido à introdução de relva sintética nas planícies de inundação, que se evidencia, desta forma, como um obstáculo à capacidade de vazão total do canal. Por outro lado, a diminuição dos valores da velocidade nitidamente verificada no leito de cheia, esbate-se quando se analisa o leito principal e se efectua a comparação às velocidades presentes num escoamento num fundo sem relva.

A Figura 5.27 indica ainda que, neste tipo de fundo e altura de água, o regime uniforme imposto é suportado pelo comportamento similar dos vários perfis, mesmo que se identifiquem, na secção X7500, velocidades ligeiramente distintas, se comparadas com os valores das outras duas secções transversais, não indo de encontro ao desenvolvimento normal da camada de mistura na interface das duas subsecções do canal.

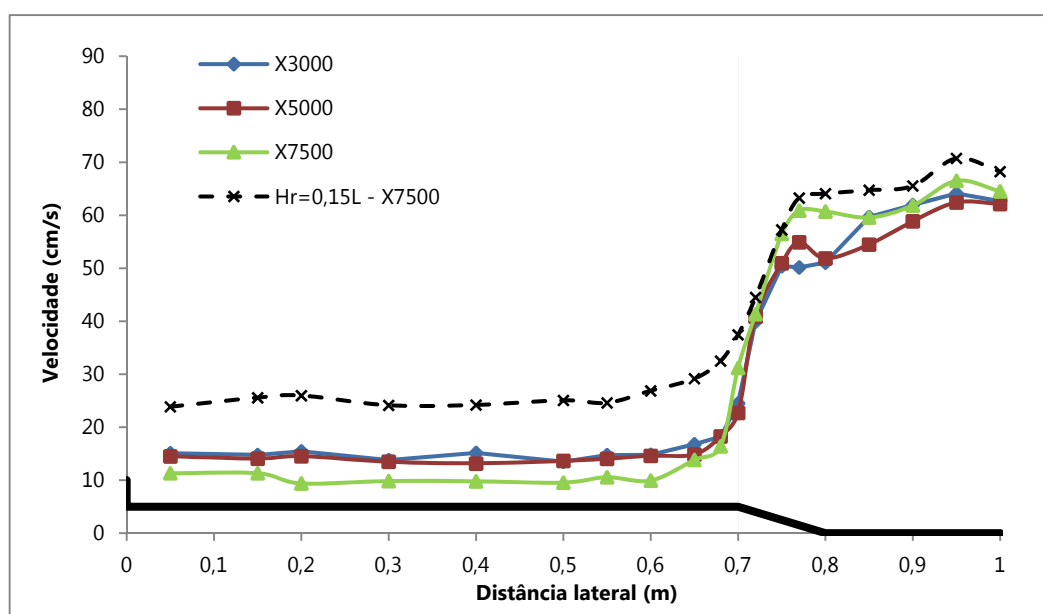


Figura 5.27 - Distribuição transversal das velocidades média em profundidade em regime uniforme - $h_r=0,15$ em fundo rugoso para três secções e $h_r=0,15$ em fundo liso na secção X7500.

O desenvolvimento da camada limite está presente nos perfis verticais de velocidade para fundo rugoso (Figura 5.28), verificando-se velocidades longitudinais mais baixas do que no fundo liso, como visto na Figura 5.27.

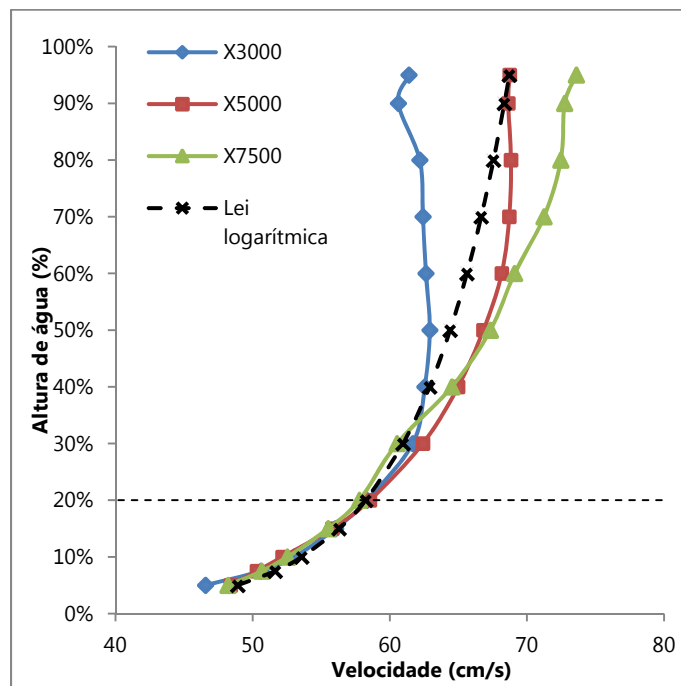


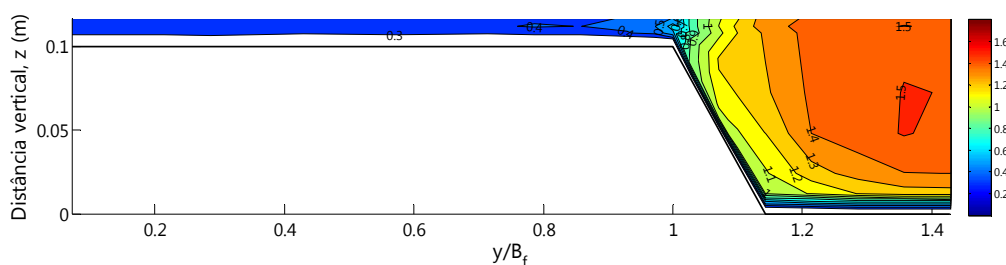
Figura 5.28 - Perfis verticais da velocidade longitudinal para $Y=100$ (cm) em regime uniforme - $h_r=0,15$ fundo rugoso.

As isolinhas da velocidade longitudinal, apresentadas na página seguinte, na Figura 5.29, demonstram o aumento das velocidades de montante para jusante no leito principal, sendo que, os maiores valores se encontram no centro desse leito, relacionado com o alargamento da camada de mistura no mesmo sentido. No leito de cheia não se observam grandes diferenças de comportamento entre as várias secções, mas evidencia velocidades substancialmente menores face ao leito principal, devido à presença da relva que gera atrito, diminuindo a velocidade da água.

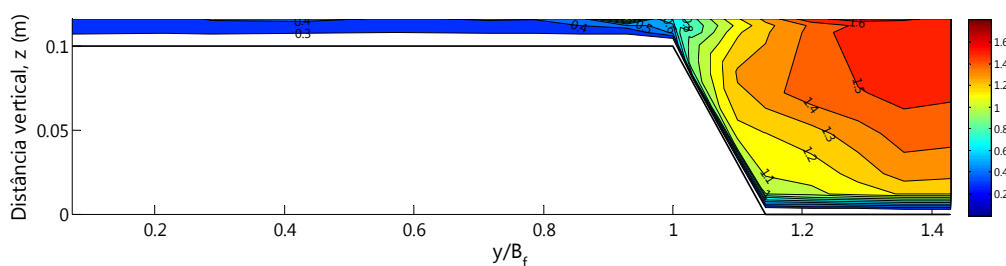
Um fenómeno que as isolinhas permitem aferir, relaciona-se com as correntes secundárias. Na medida em que a rugosidade introduzida nos leitos de cheia retarda o escoamento nesta região, expectavelmente, haveria uma tendência por parte do leito principal, com velocidades mais elevada, de equilibrar este diferencial através da propagação de massa de água para o leito de cheia. De facto, as inflexões registadas nas isolinhas das velocidades longitudinais, ao longo das várias secções transversais, mostram a passagem de matéria no sentido do leito principal para as planícies laterais, bem como, inflexões nas isolinhas que instauram transferências de massa no sentido contrário. Estas

permutas de massa são mais evidentes nas secções X5000 e X7500, possivelmente devido ao maior desenvolvimento da camada de mistura entre os dois escoamentos. Será de referir, que a camada de mistura se apresenta mais evidente e com maior intensidade em fundo rugoso, quando comparada com o que se verifica para $h_r=0,15$ em fundo liso (Figura 5.29 (d)).

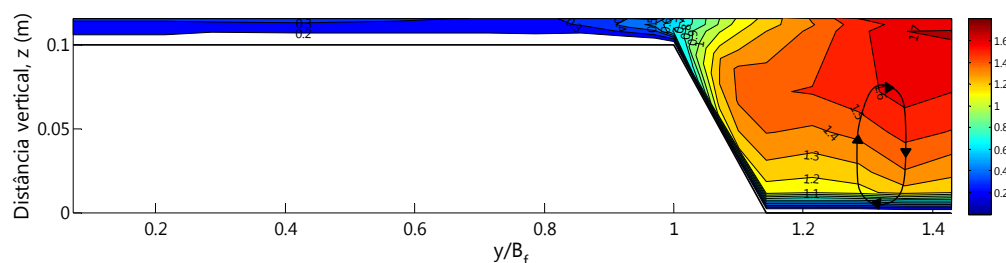
Genericamente as isolinhas obtidas para fundo rugoso, relativamente às correntes secundárias, apresentam padrões de comportamento observados para fundo liso, como apresentado na Figura 5.29 (d). Ainda assim, aparentam possuir fenómenos turbulentos com uma maior intensidade e com maior tendência para serem lateralizados do leito principal para o leito de cheia, devido ao maior gradiente de velocidades entre o fluxo de água nas duas planícies, imposto pelo atrito gerado pela relva.



a)



b)



c)

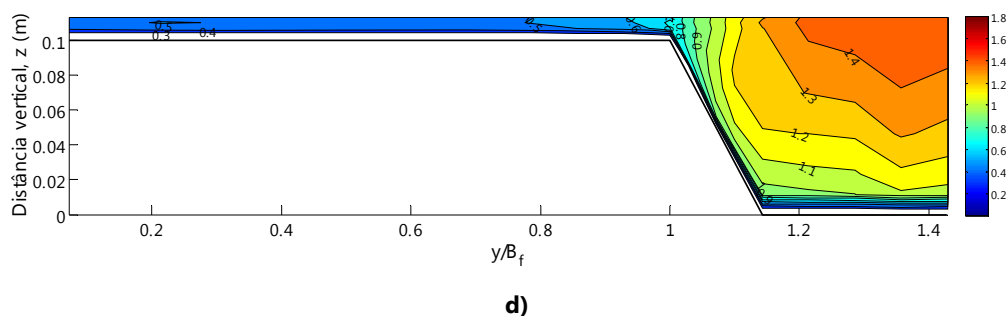
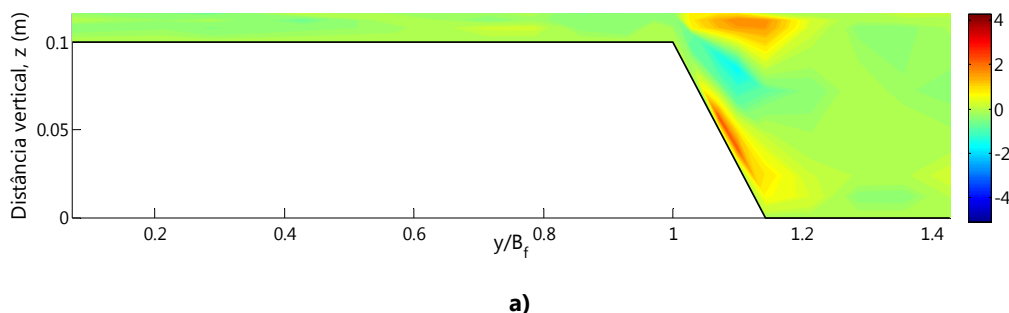


Figura 5.29 - Isolinhas da velocidade U/U_f , em regime uniforme- $h_r=0,15$ em fundo rugoso para: a) Seção X3000; b) Seção X5000; c) Seção X7500 com esquema do vórtice de eixo horizontal; d) $h_r=0,15$ fundo liso para a seção X7500.

As velocidades transversais (Figura 5.30) ao escoamento apresentam valores que mostram transferência de massa entre os dois leitos, nos dois sentidos, como havia sido abordado nos parágrafos anteriores, relativos às isolinhas da velocidade longitudinal. A presença de correntes secundárias no leito principal parece ser corroborada pelas velocidades transversais medidas, observando os valores positivos e negativos que se desenvolvem nesta região.

As isolinhas para fundo liso (Figura 5.4 (c)) demonstram, presumivelmente, que, as correntes secundárias se revelam mais fortes e com mais energia num escoamento em fundo rugoso, pois podem-se observar valores de velocidade transversal que contrastam mais entre si, ou seja, em fundo rugoso, as isolinhas manifestam, no seu desenvolvimento, um intervalo maior de valores, correspondendo a uma maior movimentação de massa de água.

Voltando aos resultados apresentados no Quadro 5.10, estes apontam para uma transferência de massa, ao longo do canal, do leito de cheia para o leito principal, porém, os resultados das isolinhas das velocidades transversais parecem contrariar essa transferência. Do ponto de vista físico, o que deve acontecer é uma transferência de massa do leito de cheia rugoso para o leito principal. No entanto, essa transferência é “obstruída” pelas elevadas velocidades existentes no leito principal, o que faz com que a massa de água que tenta penetrar no leito principal, mergulhe em profundidade e dê origem a uma célula secundária com grande intensidade (Figura 5.30 (c)).



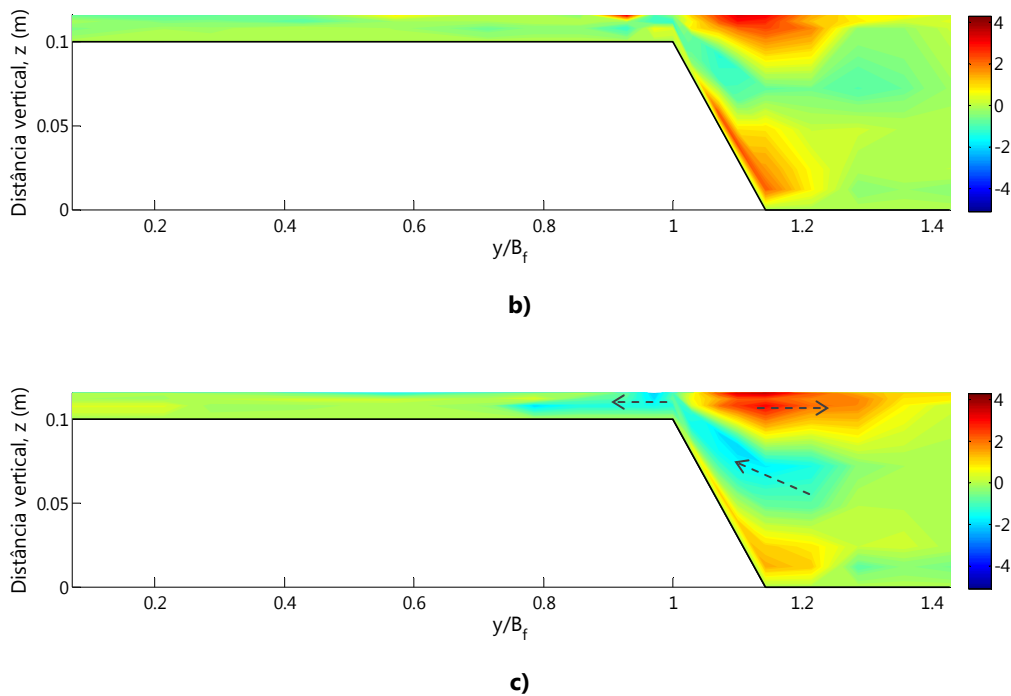
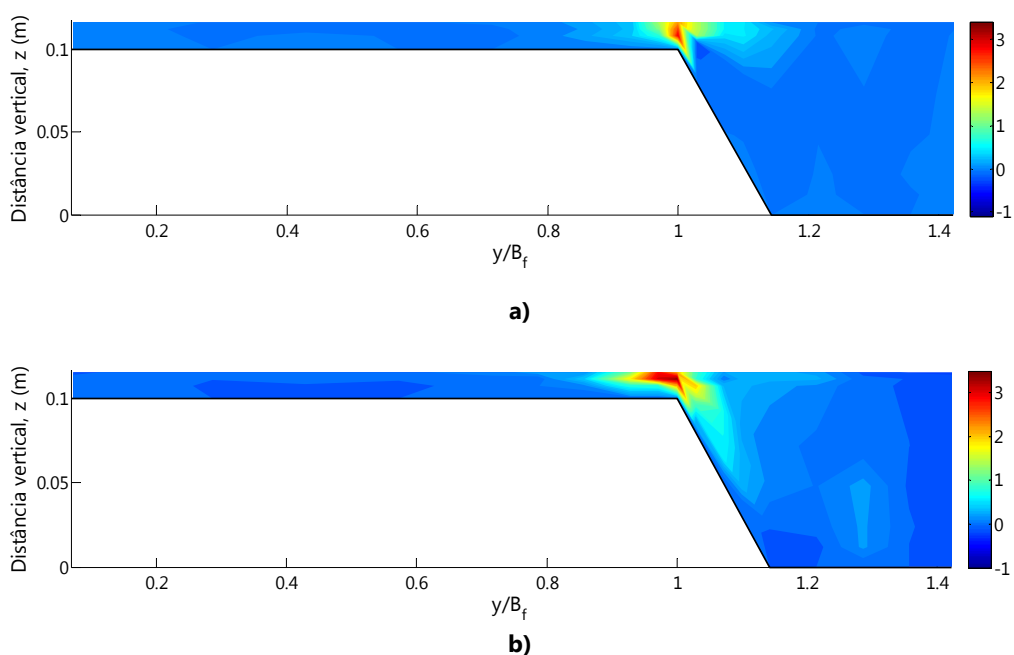


Figura 5.30 - Isolinhas das velocidades transversais (cm/s) em regime uniforme - $h_r=0,15$ em fundo rugoso para: a) Secção X3000; b) Secção X5000; c) Secção X7500.

A distribuição das tensões de Reynolds presentes na Figura 5.31 para três secções transversais, revelam valores mais elevados na interface dos dois leitos. Como se verificou nas isolinhas das velocidades V e U , é na interface que se desenvolvem as transferências de massa e onde velocidades de diferentes intensidades se desenvolvem, havendo grande turbulência levando ao substancial aumento das tensões, face ao fundo liso (Figura 5.5).



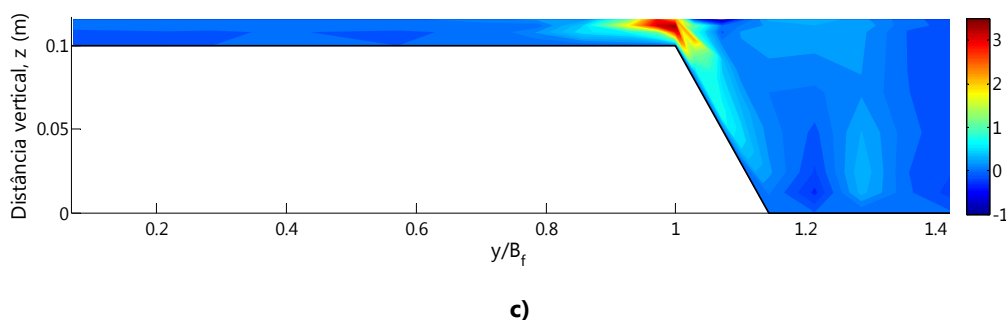


Figura 5.31 - Isolinhas das tensões de Reynolds τ_{xy} (Pa) em regime uniforme - $h_r=0,15$ em fundo rugoso para: a) Secção X3000; b) Secção X5000; c) Secção X7500.

Apresentam-se nas próximas páginas os resultados para $h_r=0,30$ em fundo rugoso.

No Quadro 5.11 mostram-se os caudais obtidos experimentalmente ao longo do canal. Tal como acontece para $h_r=0,15$ (Quadro 5.10) verifica-se uma transferência de massa dos leitos de cheia para o leito principal. Embora essa transferência seja percentualmente inferior para $h_r=0,30$.

Quadro 5.11 – Caudais (l/s) obtidos experimentalmente em regime uniforme - $h_r=0,30$ em fundo rugoso.

Secções transversais (mm)	Caudal (l/s)			Diferença entre caudal experimental e imposto
	LC	LP	Total	
X3000	17,061	43,678	60,738	3,12%
X5000	16,491	45,214	61,705	4,76%
X7500	15,070	46,513	61,583	4,56%

O perfil da velocidade média (Figura 5.32) a 40% da altura de água e o perfil das velocidades médias segundo a integração em profundidade dos valores de U , como anteriormente explicitado, demonstra, mais uma vez, o semelhante desenvolvimento das duas distribuições de velocidade, permitindo, dessa forma, utilizar e assumir as velocidades medidas a 40% da altura de água como as velocidades médias em profundidade.

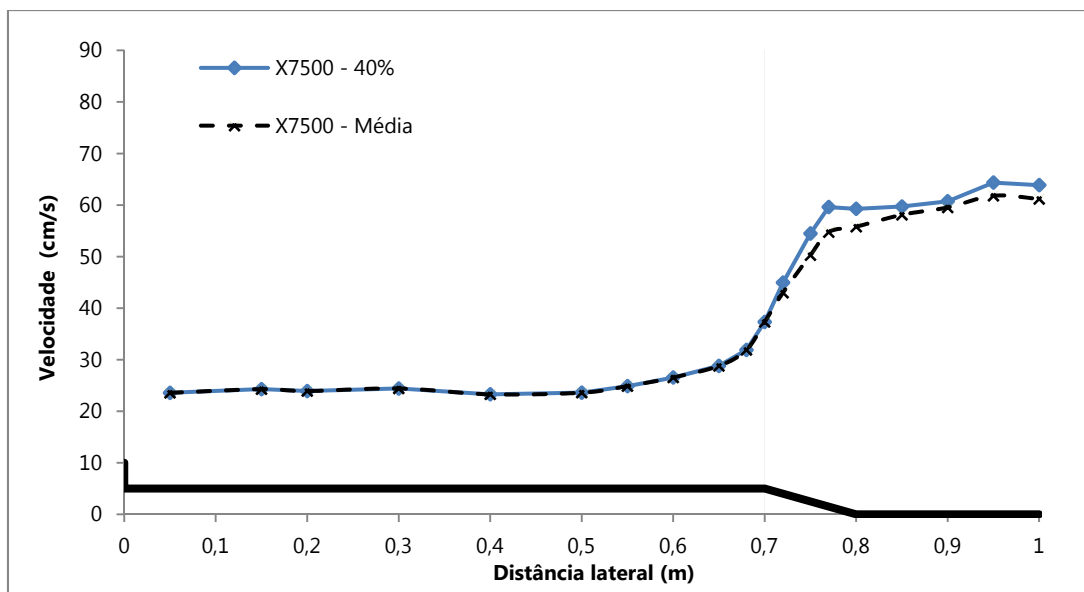


Figura 5.32 - Distribuição transversal das velocidades a 40% da altura de água e da velocidade média segundo o método de integração em profundidade - $h_r=0,30$ em fundo rugoso na secção X7500.

Na distribuição das médias da velocidade em profundidade em todas as secções (Figura 5.33), verifica-se um padrão de comportamento, evidenciando o regime uniforme imposto. Verificam-se menores velocidades no leito de cheia para a secção mais a jusante, aumentando depois no leito principal, facto que vai contra o expectável para o desenvolvimento de uma camada de mistura na interface.

A interpretação das velocidades médias em profundidade feita para $h_r=0,15$ em fundo rugoso ($h_r=0,15R$) face à mesma altura relativa em fundo liso, segue o mesmo comportamento encontrado para $h_r=0,30$, no que respeita aos leitos de cheia. As velocidades apresentam-se, aproximadamente, 80% inferiores nos leitos de cheia aquando da presença de panos de relva nos leitos de cheia, face a fundo liso. No leito principal a distribuição das velocidades apresenta um desenvolvimento diferente para $h_r=0,30$, ou seja, não obstante o substancial abaixamento das velocidades nos leitos de cheia identificado em fundo rugoso, verifica-se que no leito principal essa diferença mantém-se praticamente a mesma.

Comparando somente as duas alturas relativas para fundo rugoso, em $h_r=0,30$ ($h_r=0,30R$) a distribuição das velocidades é maior do que em $h_r=0,15$ ($h_r=0,15R$) nos leitos de cheia, porém, no leito principal essa diferença é quase inexistente (Figura 5.34).

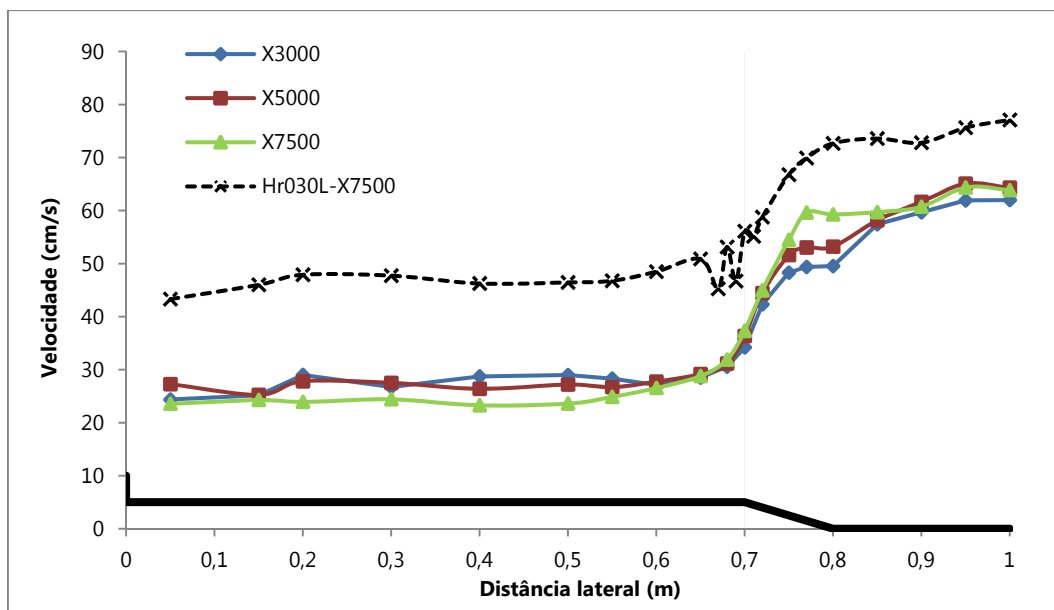


Figura 5.33 - Distribuição transversal das velocidades médias em profundidade em regime uniforme - $h_r=0,30$ em fundo rugoso para três secções e $h_r=0,30$ em fundo liso na secção X7500.

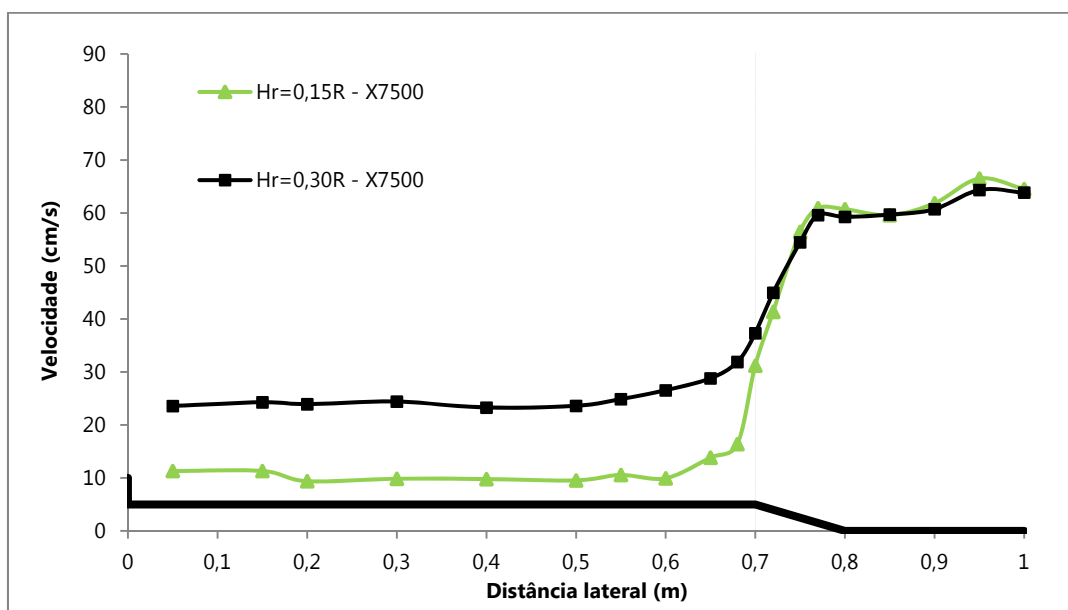


Figura 5.34 - Distribuição transversal das velocidades médias em profundidade em regime uniforme - $h_r=0,15$ e $h_r=0,30$ em fundo rugoso na secção X7500.

Os perfis verticais de velocidade (Figura 5.35) a meio do leito principal representam bem o desenvolvimento da camada limite turbulenta, no entanto, o perfil logarítmico não se enquadra nos

mesmos, evidenciando dessa forma um que a influência dos leitos de cheia rugosos se faz sentir no centro do canal principal.

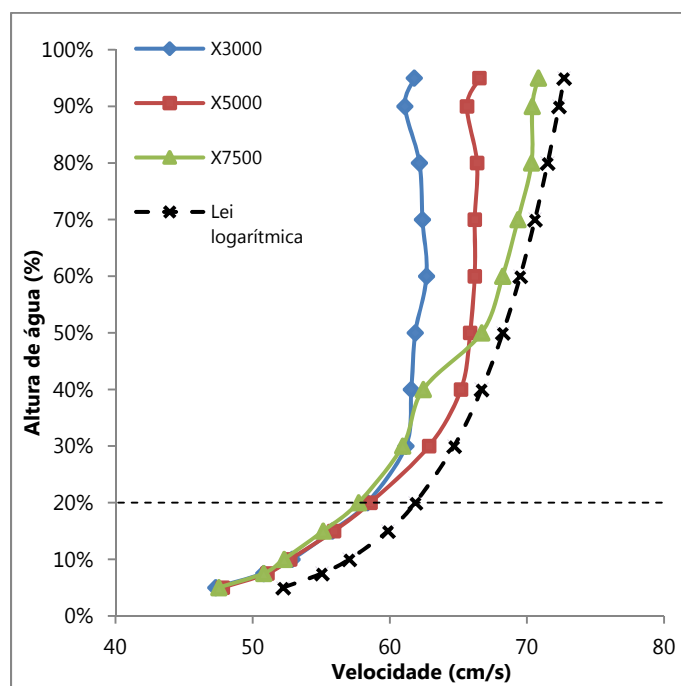


Figura 5.35 - Perfis verticais de velocidade longitudinal para $Y=100$ (cm) em regime uniforme - $h_r=0,30$ fundo rugoso.

Relativamente às isolinhas das velocidades longitudinais (Figura 5.36), pode-se identificar um aumento nas velocidades no leito principal de montante para jusante e uma ligeira diminuição no leito de cheia, indo ao encontro dos valores observados no Quadro 5.11 e aos perfis de velocidades da Figura 5.33.

Desde a primeira secção até à que se encontra mais a jusante, observa-se na região de fronteira das duas subsecções o crescimento da camada de mistura, acompanhando a transferência de massa entre os leitos, que nestas condições é menos intensa do que para $h_r=0,15$ em fundo rugoso (Figura 5.29), mas mais intensa do que o encontrado em $h_r=0,30$ em fundo liso (Figura 5.36 (d)). Nas figuras Figura 8.2, Figura 8.3 e Figura 8.4 em anexo é possível observar estes factos, observados no canal por via de inserção de um corante no escoamento.

A presença de correntes secundárias no leito principal não fica totalmente perceptível através da análise das isolinhas das velocidades longitudinais.

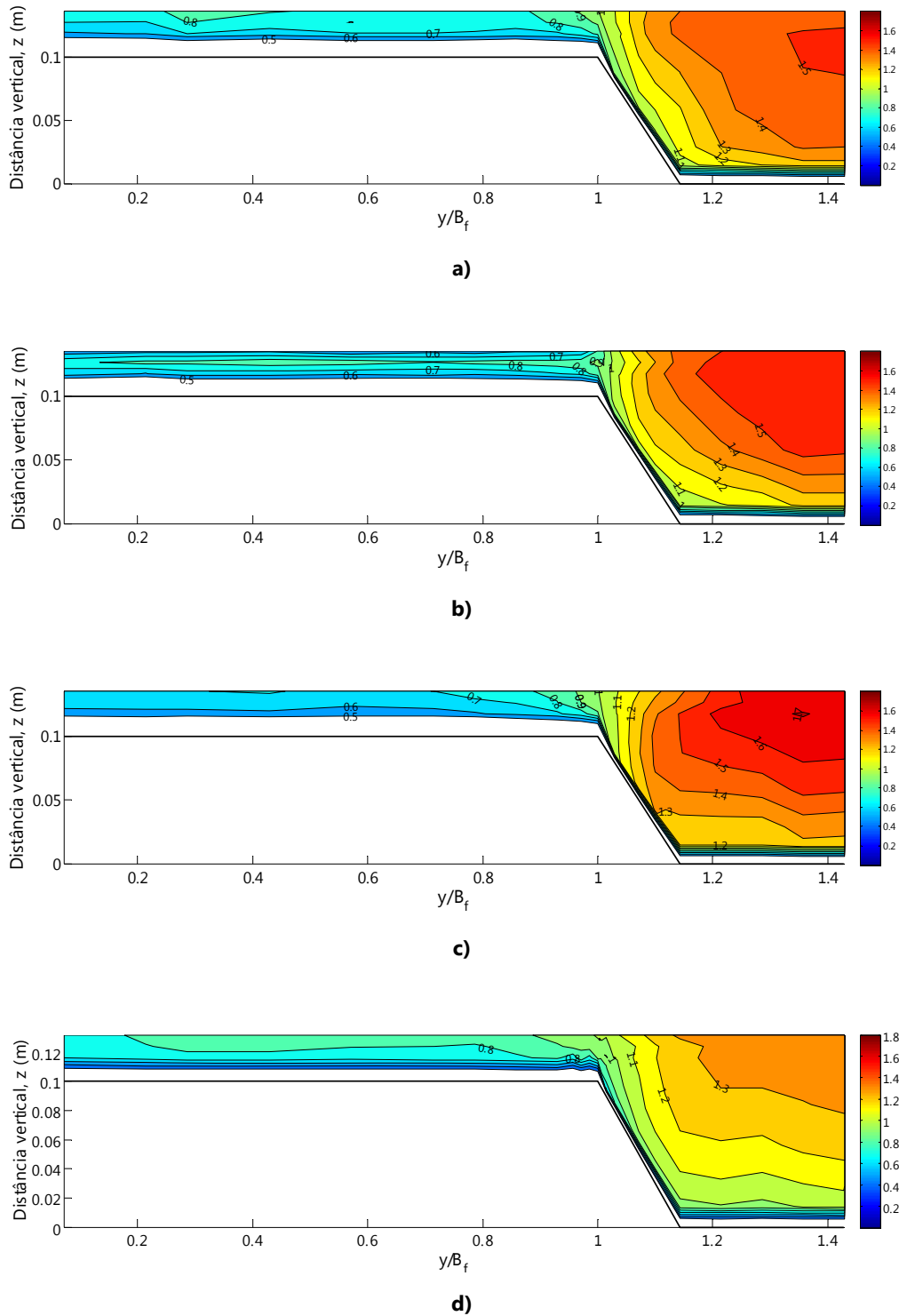


Figura 5.36 - Isolinhas da velocidade U/U_s em regime uniforme - $h_r=0,30$ em fundo rugoso para: a) Secção X3000; b) Secção X5000; c) Secção X7500 com esquema de vórtice de eixo horizontal; e d) $h_r=0,30$ fundo liso para a secção X7500.

As velocidades transversais (Figura 5.37) corroboram as transferências de massa na interface e o desenvolvimento da camada de mistura identificadas na Figura 5.36, demonstrando também uma

menor transferência de massa do leito principal para o leito de cheia, face ao que foi observado para $h_r=0,15$ em fundo rugoso (Figura 5.30), resultante das velocidades de escoamento menos elevadas para alturas relativas entre leitos mais baixas.

Fazendo uma comparação com $h_r=0,30$ em fundo liso (Figura 5.16), é possível realçar o impacto da presença da relva nas permutas de massa entre leito de cheia e o leito principal, pois nas isolinhas da Figura 5.37 encontram-se velocidades transversais negativas no leito principal, que se propagam para o leito de cheia, em oposição ao observado para uma situação de fundo liso nos dois leitos.

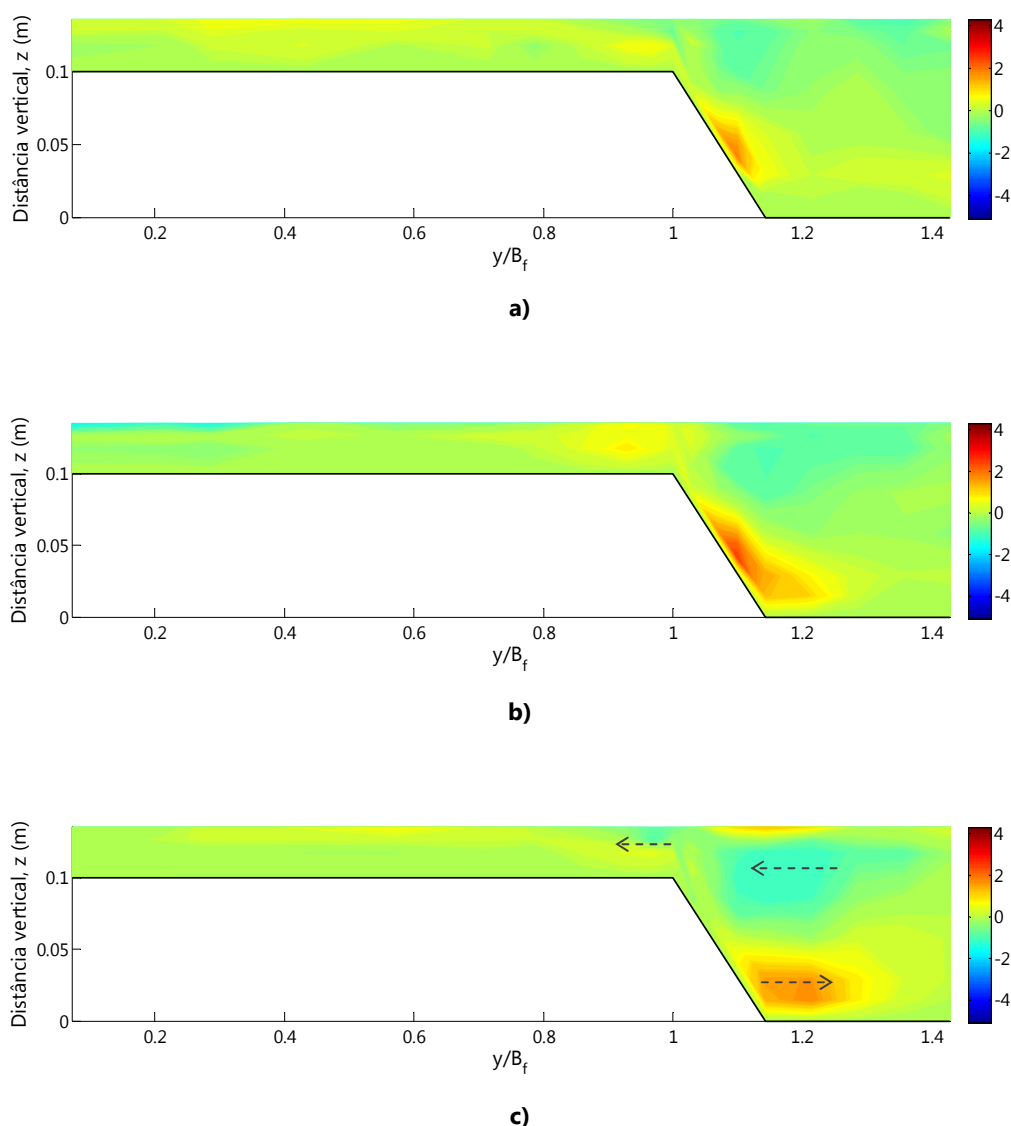


Figura 5.37 - Isolinhas das velocidades transversais (cm/s) em regime uniforme - $h_r=0,30$ em fundo rugoso para: a) Secção X3000; b) Secção X5000; c) Secção X7500.

As tensões de Reynolds τ_{xy} (Figura 5.38) demonstram para fundo rugoso o desenvolvimento da camada de mistura ao longo do comprimento longitudinal do canal na região de interface, sendo que, comparativamente ao fundo liso para a mesma altura relativa (Figura 5.17) apresentam valores mais elevados, e menos elevados do que $h_r=0,15$ em fundo rugoso (Figura 5.31). Desta forma, confirmam o que tem vindo a ser dito relativamente a $h_r=0,30$ em fundo rugoso.

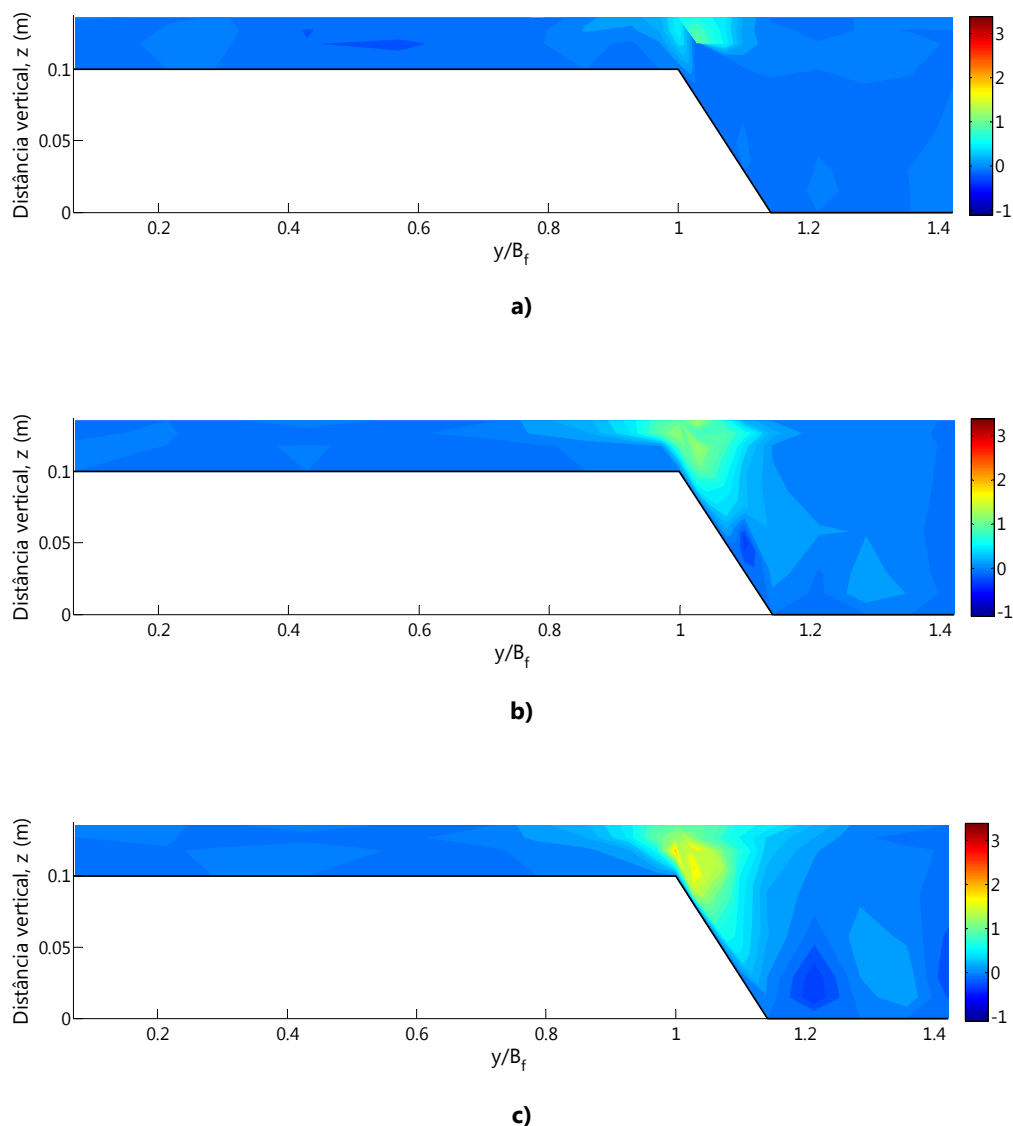


Figura 5.38 - Isolinhas das tensões de Reynolds τ_{xy} (Pa) em regime uniforme - $h_r=0,30$ em fundo rugoso para: a) Secção X3000; b) Secção X5000; e c) Secção X7500.

6 Conclusões

Tendo em conta todo o trabalho desenvolvido, quer em termos de recolha de dados, quer na sua análise e comparação, o presente capítulo pretende incluir, em suma, as ilações e conclusões mais relevantes que foram obtidas.

A presente dissertação teve o objectivo de estudar parâmetros e características de escoamentos em canais com secção composta, que sejam encontrados na realidade, permitindo, dessa forma, aprofundar conhecimentos nesta área científica. Por isso, enveredou-se pela investigação de planícies de inundação com rugosidade superior à do leito principal e de regimes de escoamento não uniformes, fazendo a comparação com fundos lisos e regimes de escoamento uniformes, para diferentes alturas relativas de água entre as subsecções do canal.

Os dados que serviram de base para o desenvolvimento desta dissertação, foram obtidos através de procedimentos experimentais realizados num canal prismático. Nessa medida, todos os trabalhos foram efectuados com consciência, responsabilidade, rigor e sentido crítico, de forma a preservar a veracidade de todos os dados, tendo sido repetidas medições quando dúvidas pudessem existir.

Recolheram-se dados de velocidade em duas direcções e em diversas secções transversais do canal (*X1100*, *X3000*, *X5000*, *X7500*). Foi assim possível definir vários perfis de velocidade média, quer temporais, quer em profundidade, analisar transferências de massa de fluido, e incorporar a distribuição das Tensões de Reynolds no escoamento, evidenciando as interacções mais importantes que nele se processam.

A apresentação das conclusões mais relevantes tiradas do trabalho desenvolvido vai ser efectuada começando pelas condições de fundo liso:

- O aumento da altura relativa em regime uniforme, com leitos de cheia lisos, resulta num aumento das velocidades longitudinais em toda a secção, sendo que, percentualmente, o aumento verificado é maior nos leitos de cheia;
- Quanto menor a altura relativa mais alta é a percentagem de transferência de massa entre os dois leitos, sendo maior do leito principal para o leito de cheia;
- Os maiores valores de tensões de Reynolds são encontrados na interface entre os dois leitos, existindo maior intensidade para alturas relativas mais baixas (i.e., vórtices de eixo vertical mais intensos). Estes valores comprovam também o desenvolvimento e

alargamento da camada de mistura na mesma zona da interface, de montante para jusante;

- A subalimentação (regime não uniforme) dos leitos de cheia causa uma diminuição da altura de água média, face ao encontrado para regime uniforme, com o mesmo caudal total. No sentido contrário, a sobrealimentação dos leitos de cheia causa o aumento das alturas médias de água comparando com o regime uniforme. Este aumento é proporcional à percentagem de sobrealimentação imposta;
- Numa situação de subalimentação (-19%) dos leitos de cheia observam-se menores velocidades nesses leitos. Por outro lado, quanto maior for a percentagem de sobrealimentação, maior a velocidade nas planícies de inundação, no entanto, no leito principal as maiores velocidades são verificadas para um regime -19% e as menores para a maior percentagem de sobrealimentação (+53%);
- Quando os leitos de cheia são subalimentados existe transferência de massa do leito principal para os leitos laterais do canal, perceptível, principalmente, para $h_r=0,30$. Este facto é suportado pelas tensões de Reynolds, que são bastante superiores na zona da interface dos dois leitos para o regime -19%, comparando com os restantes regimes;
- No regime não uniforme a presença de correntes secundárias foi, principalmente, verificada no caso de subalimentação dos leitos de cheia.

Os resultados obtidos em regime uniforme aquando da colocação de vegetação nos leitos de cheia e após comparação com leitos de cheia lisos permitiu tirar as seguintes conclusões:

- Para uma altura relativa semelhante, o caudal imposto a montante em fundo rugoso, de forma a termos um regime de escoamento uniforme, é menor do que para fundo liso.
- A presença de rugosidade nos leitos de cheia retarda substancialmente a velocidade de escoamento. A velocidade no leito de cheia é cerca do dobro em fundo liso $h_r=0,15$ face à mesma altura relativa em fundo rugoso e fazendo a mesma comparação no mesmo leito para $h_r=0,30$, com fundo liso as velocidades são cerca de 80% mais elevadas do que com fundo rugoso. É ainda de realçar, o facto de as velocidades medidas para fundo rugoso no leito principal, terem valores semelhantes para as duas alturas relativas, contrastando com as velocidades bem mais elevadas encontradas para $h_r=0,30$ face a $h_r=0,15$ nos leitos de cheia;
- As transferências de massa entre leitos são mais intensas para fundo rugoso do que aquelas encontradas em fundo liso, existindo também um desenvolvimento da camada de

mistura mais evidente. Porém, devido à presença da rugosidade no leito de cheia, o alargamento da camada de mistura nesse leito, mostra-se menor do que com leitos de cheia lisos;

- As correntes secundárias identificadas em condições de fundo rugoso aparentam uma lateralização no sentido do leito de cheia;
- Relativamente às tensões de Reynolds na região de interface entre leitos, apresentam-se mais elevadas em fundo rugoso do que em fundo liso para as mesmas alturas relativas.

A área de estudo científica onde se insere esta dissertação tem muitas abordagens e caminhos que se podem seguir, para que cada vez mais se complementem conhecimentos e se entendam os fenómenos nela envolvidos. Nessa medida, ficam aqui algumas sugestões para futuras investigações:

- Mudança no tipo de rugosidade imposta nos leitos de cheia recorrendo a elementos verticais;
- Imposição de diferentes rugosidades no leito principal;
- Estudo de regimes não uniformes com leitos de cheia rugosos.

7 Bibliografia

- 1 FERNANDES, J.; LEAL, J. e CARDOSO, A. - *Apparent friction coefficient in straight compound channels*. Journal of Hydraulic Research, vol. 49, nº 6, págs. 836-838., 2011.
- 2 MASSA, P. - *Influência da rugosidade dos leitos de cheia em escoamentos em canais de secção composta*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil - Perfil de Construção. Universidade Nova de Lisboa - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Monte da Caparica. 176 págs, 2011.
- 3 MASSEY, B. - *Mecânica dos Fluidos*. 6th Edição. Lisboa, Fundação Calouste Gulbenkian, 2002.
- 4 NEZU, I.; ONITSUKA, K. e IKETANI, K. - *Coherent horizontal vortices in compound open channel flows.*, págs. 17-32., 1999.
- 5 NEZU, I. e NAKAGAWA, H. - *Coherent horizontal vortices in compound open channels flows.*, págs. 373-375. Balkema, 1993.
- 6 NEZU, I. - - *Compound Open-Channel Turbulence and its Role in River Environment.*, 9th Congress of the Asian and PACific Division of IAHR, Keynote address, Singapore, 1994.
- 7 SHIONO, K. e KNIGHT, D. - *Turbulent open-channel flows with variable depth*. Journal of Fluid Mechanics, vol. 222, págs. 617-646., 1991.
- 8 PINTO, D. - *Caracterização experimental de escoamentos em canais de secção composta*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil – Perfil de Construção. Universidade Nova de Lisboa – Faculdade de Ciência e Tecnologia, Monte da Caparica. 113 págs, 2010.
- 9 GORING, D. G. e NIKORA, V. I. - *Despiking acoustic Doppler velocimeter records*. Journal of Hydraulic Engineering, vol. 128, págs. 117-126., 2002.
- 10 PROUST, S.; BOUSMAR, D.; RIVIÈRE, N.; PAQUIER, A. e ZECH, Y. - *Energy losses in compound open channels*. Advances in water Resources, vol. 33, nº 1, págs. 1-16., 2010.
- 11 BOUSMAR, D.; RIVIÈRE, N.; PROUST, S.; PAQUIER, A.; MOREL, R. e ZECH, Y. - *Upstream Discharge Distribuiton in Compound-Channel Flumes*. Journal of Hydraulic Engineering, vol. 131, nº 5, págs. 408-412., 2005.

- 12 SHIONO, K.; CHAN, T.; SPOONER, J.; RAMESHWARAN, P. e CHANDLER, J. - *The effect of floodplain roughness on flow structures, bedforms and sediment transport rates in meandering channels with overbank flows: Part I*. Journal of Hydraulic Research, vol. 47, nº 1, págs. 5-19., 2009.
- 13 SHIONO, K.; CHAN, T.; SPOONER, J.; RAMESHWARAN, P. e CHANDLER, J. - *The effect of floodplain roughness on flow structures, bedforms and sediment transport rates in meandering channels with overbank flows: Part II*. Journal of Hydraulic Research, vol. 47, nº 1, págs. 20-28., 2009.
- 14 TEIXEIRA, E. - *Estudo experimental de escoamentos em regime uniforme e não uniforme em canais de secção composta*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil – Perfil de Construção. Universidade Nova de Lisboa – Faculdade de Ciência e Tecnologia, Monte da Caparica. 89 págs, 2011.
- 15 YANG, K.; CAO, S. e KNIGHT, W. D. - *Flow Patterns in Compound Channels with Vegetated Floodplains*. Journal of Hydraulic Engineering, vol. 133, nº 2, págs. 148-159., 2007.
- 16 Nortek AS - - *Vectrino Velocimeter User Guide*. Noruega, Nortek, 2009.
- 17 PROOIJEN, B.; BATTJES, J. e UITTEWAAL, W. - *Momentum Exchange in Straight Uniform Compound*. Journal of Hydraulic Engineering, vol. 131, nº 3, págs. 175-183., 2005.
- 18 NIJS, M. - *Sensitivity of shallow mixing layers to upstream turbulence*. Master Thesis. Delft University of Technology - Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft, 92 págs, 2003.

8 Anexos

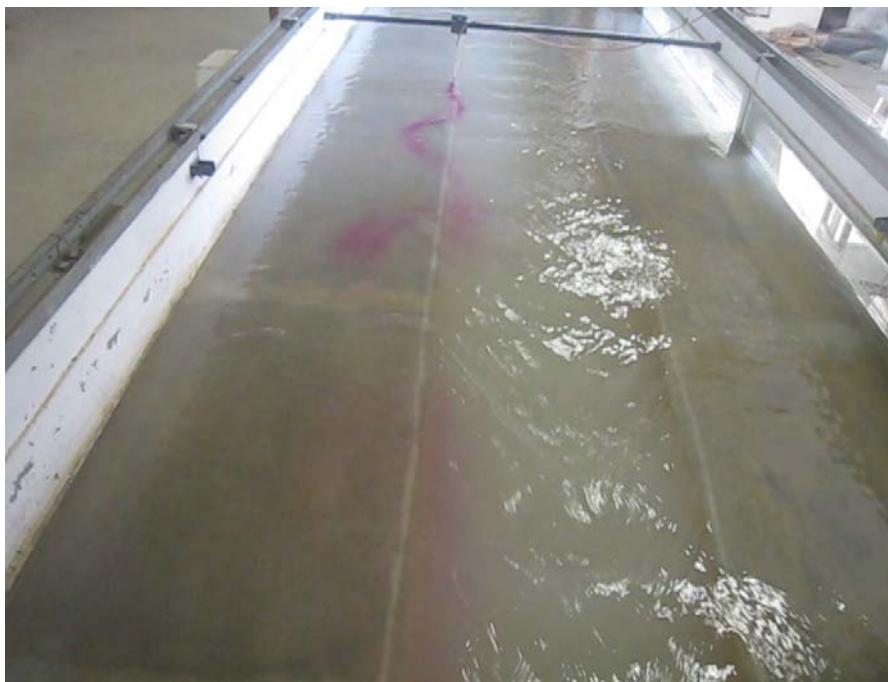


Figura 8.1 – Injeção de corante roxo no escoamento na zona de interface em regime uniforme - $h_r=0,15$ em fundo liso.

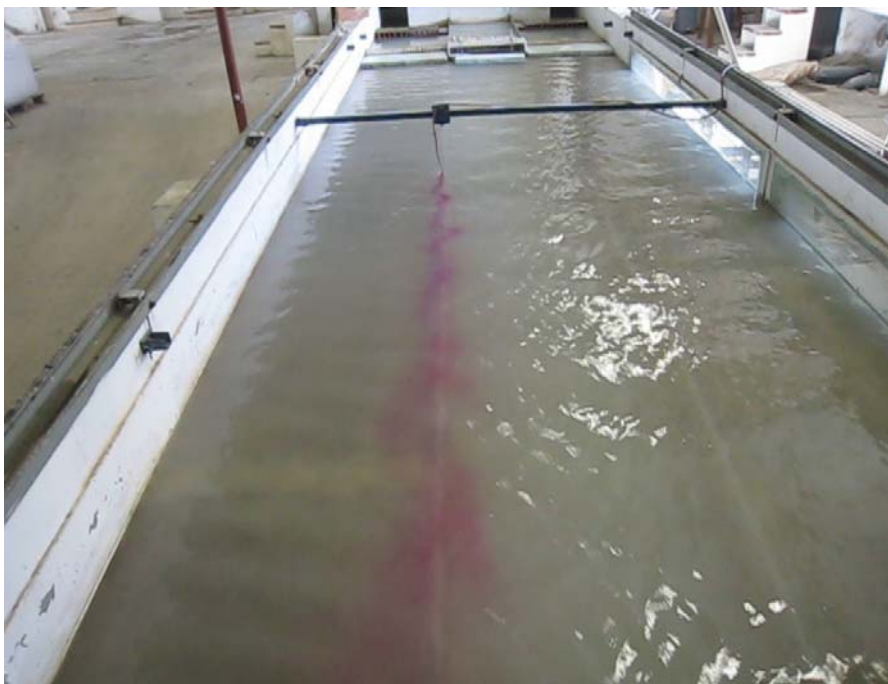


Figura 8.2 - Injeção de corante roxo no escoamento na zona de interface em regime uniforme - $h_r=0,30$ em fundo liso.

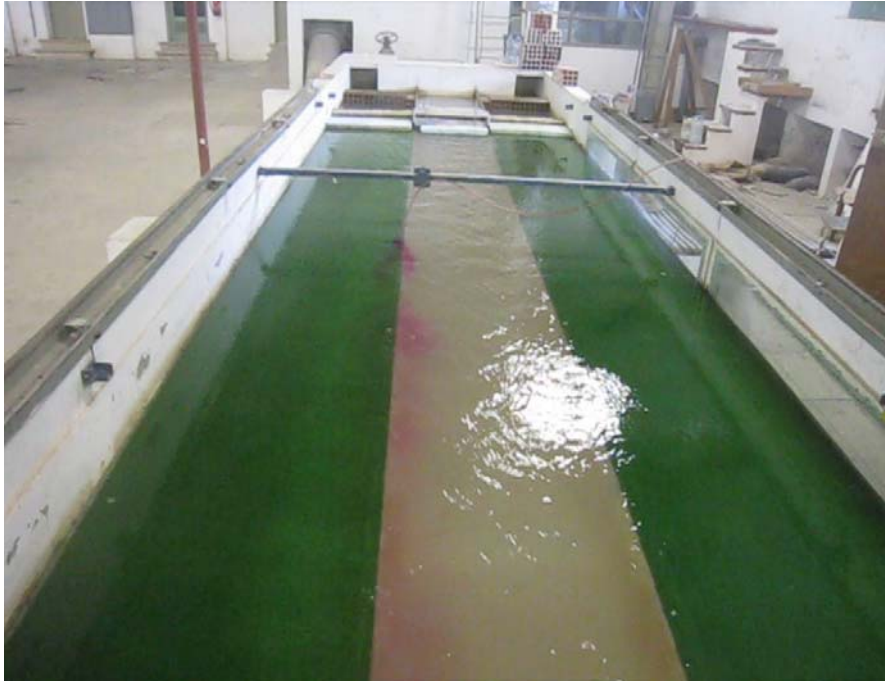


Figura 8.3 - Inserção de corante roxo no escoamento na zona de interface em regime uniforme - $h_r=0,15$ em fundo rugoso.

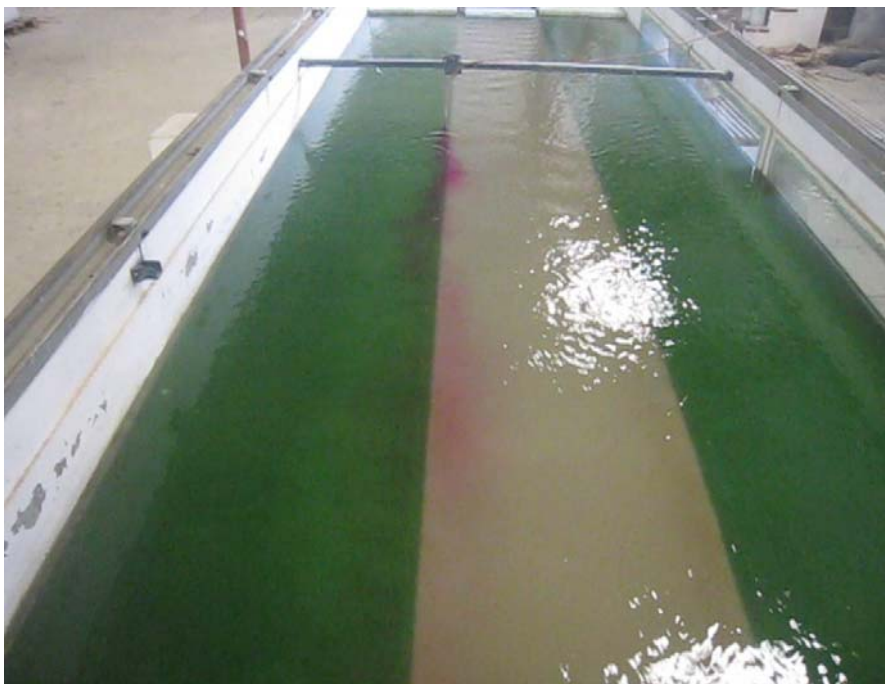


Figura 8.4 - Inserção de corante roxo no escoamento na zona de interface em regime uniforme - $h_r=0,30$ em fundo rugoso.